www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 26, 1964/65, no. 8/9/10

De nieuwe gebouwen voor de laboratoria in Aken en Hamburg die de Philips Zentrallaboratorium GmbH begin 1964 in gebruik heeft genomen, zijn in oktober 1964 aan de wetenschappelijke wereld voorgesteld. Deze gelegenheid is te baat genomen om een overzicht van het werk van deze beide laboratoria samen te stellen, dat hier aan onze lezers wordt aangeboden. Dergelijke overzichten — de lezer zal zich wellicht het in oktober 1963 verschenen speciale nummer herinneren dat aan het werk van het, naar nieuwe gebouwen verhuizende, Eindhovense laboratorium was gewijd — lijken ons nuttig omdat zij elkens een dwarsdoorsnede van een activiteitsgebied met allerlei interessante detailresultaten geven.

Als inleiding tot dit nummer geeft dr. A. E. Pannenborg, lid van de directie van het Eindhovense Philipslaboratorium en tot 1 mei 1963 directeur van Philips Zentrallaboratorium GmbH, een relaas van het ontstaan der laboratoria in Aken en Hamburg. Hierop aansluitend ontwerpen dr. H. Bruining en prof. dr.ir. S. Duinker, de huidige leiders van deze laboratoria, een meer gedetailleerd beeld van het researchprogramma, waarvan een aantal voorbeelden worden gegeven in de 12 bijdragen — te weten 6 uit Aken en 6 uit Hamburg — die in dit nummer zijn opgenomen.

Ontstaansgeschiedenis van de Philips researchlaboratoria in Duitsland

A. E. Pannenborg

001.891:62.001.5

De wederopbouw der Duitse Philipsbedrijven na de tweede wereldoorlog geschiedde met aanzienlijke hulp van het moederbedrijf in Nederland. De oorlog had het verlies van vele fabrieken van de Duitse groep van het concern veroorzaakt, deels door hun ligging in de oostelijke zone, deels door vernieling tijdens oorlogshandelingen. Met grote energie en vooruitziende blik werd de wederopbouw door de centrale leiding in Hamburg ter hand genomen. Bestaande bedrijven werden hersteld en vele nieuwe gesticht, zoals in Aken, Wetzlar en Krefeld. Halverwege de jaren vijftig had de uitbreiding der bedrijven en daarmede de omzet een niveau bereikt waarin het organisatorisch gewenst en financieel mogelijk leek, het eigen potentieel met een competente laboratoriumgroep te versterken. Voordien had men zich vrijwel uitsluitend met de vervaardiging van massaprodukten beziggehouden. Men meende terecht dat het onontkoombaar was, het toekomstige programma aan te vullen met gespecialiseerde artikelen, zoals bedrijfsapparatuur en professionele bouwelementen. Men besloot derhalve een wetenschappelijk laboratorium te stichten.

Natuurlijk bezat het concern als geheel reeds lang eigen laboratoria. Gedurende de eerste wereldoorlog werd in het concerncentrum Eindhoven een afdeling voor wetenschappelijk onderzoek opgericht, die later de naam „Natuurkundig Laboratorium" kreeg en die zich onder leiding van prof. dr. G. Holst vruchtbaar ontwikkelde. In de jaren twintig en dertig werkten reeds vele onderzoekers van naam in dit Philipslaboratorium. De stichting van een wetenschappelijk laboratorium in Duitsland was dus geen essentieel nieuwe stap doch kon veeleer worden gezien als voortzetting van een traditie. Tot aan het uitbreken van de tweede wereldoorlog was het in Eindhoven verzamelde wetenschappelijk potentieel voldoende om de noodzakelijke instigaties aan het concern te geven. Na de oorlog maakte de stormachtige ontwikkeling van het concern op internationaal niveau een uitbreiding van de researchcapaciteit onvermijdelijk en leidde tot het stichten van concernlaboratoria in Engeland [1] en Frankrijk [2]. Het is daarbij wel duidelijk dat zulke laboratoria niet slechts een lokale taak toegewezen kregen, doch tevens een gedeelte van een gecoördineerd concernprogramma voor hun rekening dienden te nemen.

Dr. A. E. Pannenborg, directeur, Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

[1] Mullard Research Laboratories, Redhill.
[2] Laboratoires d'Electronique et de Physique appliquée, Parijs.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Oude poort van het landgoed „Bodenhof".

Toen de stichting van een Duits laboratorium werd overwogen, bleek reeds spoedig dat plaatselijke en internationale belangen gedeeltelijk met elkaar in conflict kwamen. Daar alle Duitse Philipsondernemingen hun hoofdkantoor in Hamburg hebben, lag het voor de hand ook het researchlaboratorium daar te vestigen. Anderzijds dienden de laboratoria van het concern niet te ver verspreid te liggen ten einde een veelvuldig contact tussen de onderzoekers te vergemakkelijken en een nauwe samenwerking, in internationaal verband, vooral met het grote laboratorium in Eindhoven te waarborgen. Deze overwegingen leidden tot het besluit om gelijktijdig twee laboratoria op te richten, en wel in Hamburg en in Aken. Het eerstgenoemde diende zich in eerste instantie bezig te houden met onderwerpen die voor de toekomst van belang lijken voor de ondernemingen van de Duitse concerngroep. Het laboratorium in Aken daarentegen diende zich voornamelijk te wijden aan een gedeelte van het algemene researchprogramma van het concern. Dit behoeft niet noodzakelijk onderwerpen te bevatten die specifiek voor de Duitse groep van belang zijn.

In 1955 werd het laboratorium te Aken gesticht en in 1957 dat in Hamburg. Zolang de laboratoria nog klein waren, lag het voor de hand ze te laten beheren als afdeling van de Duitse holdingmaatschappij, de Allgemeine Deutsche Philips Industrie GmbH. Na beëindiging van de aanloopperiode, toen de gezamenlijke bezetting gegroeid was tot enige honderden personen, verkregen de beide laboratoria de status van een zelfstandige dochtermaatschappij, die onder de naam Philips Zentrallaboratorium GmbH op 1 oktober 1960 werd opgericht.

Het laboratorium in Aken

De stad Aken leek ons zeer geschikt als vestigingsplaats voor een industrieel researchlaboratorium. De grootte van de stad en haar culturele en intellectuele peil beantwoorden aan de eisen die de jonge onderzoeker aan zijn omgeving zal stellen. Voorts zijn wij van mening dat de aanwezigheid van een universiteit of technische hogeschool in de vestigingsplaats als een groot voordeel beschouwd moet worden. Dit is door de praktijk bevestigd, en we geven hier graag uitdrukking aan onze erkentelijkheid voor de hulp in velerlei vormen die we van de Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule mochten ontvangen. Ten slotte heeft de aanwezigheid van een grote Philipsfabriek in Aken er aanmerkelijk toe bijgedragen dat het laboratorium aldaar op korte termijn en met goed gevolg gestart kon worden. Aanvankelijk werd het laboratorium gehuisvest in een voormalig gebouw van deze Philipsfabriek. Dit werd van den beginne af aan slechts als een voorlopige oplossing beschouwd. Reeds voordat het laboratorium werd opgericht, had men het voormalige landgoed „Bodenhof" kunnen aankopen als bouwterrein voor een nieuw laboratorium. In 1961 werd met de bouw aldaar begonnen. Tegen het begin van 1964 was de verhuizing van het gehele laboratorium met zijn staf van ongeveer 250 personen naar het nieuwe gebouw voltooid. Het voorontwerp van het nieuwe laboratoriumgebouw was gemaakt door Prof. Dr. Ing. W. Fischer. De verdere uitwerking der plannen lag in handen van de afdeling Technische Bedrijven van het Philipsconcern, welke afdeling later ook de supervisie over de eigenlijke bouw had. Aan de tijdige aankoop van de terreinen van het landgoed dankt het laboratorium zijn uitzonderlijk gunstige ligging ten opzichte van het stadscentrum en de woonwijken.

Overeenkomstig de vorenvermelde taakstelling, waarbij het Hamburgse zusterlaboratorium zich hoofdzakelijk zou bewegen op de voor de Duitse ondernemingen nieuwe werkterreinen, werd voor het laboratorium te Aken een programma van problemen uit de traditionele werkgebieden van het concern opgesteld.

Als een dezer problemen werd de lichtopwekking aan de orde gesteld — een nogal voor de hand liggende keuze voor een dochtermaatschappij van de N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken. De gloeilamp had reeds halverwege de jaren dertig een hoge graad van perfectie bereikt. Omstreeks die tijd waren dan ook alle grote

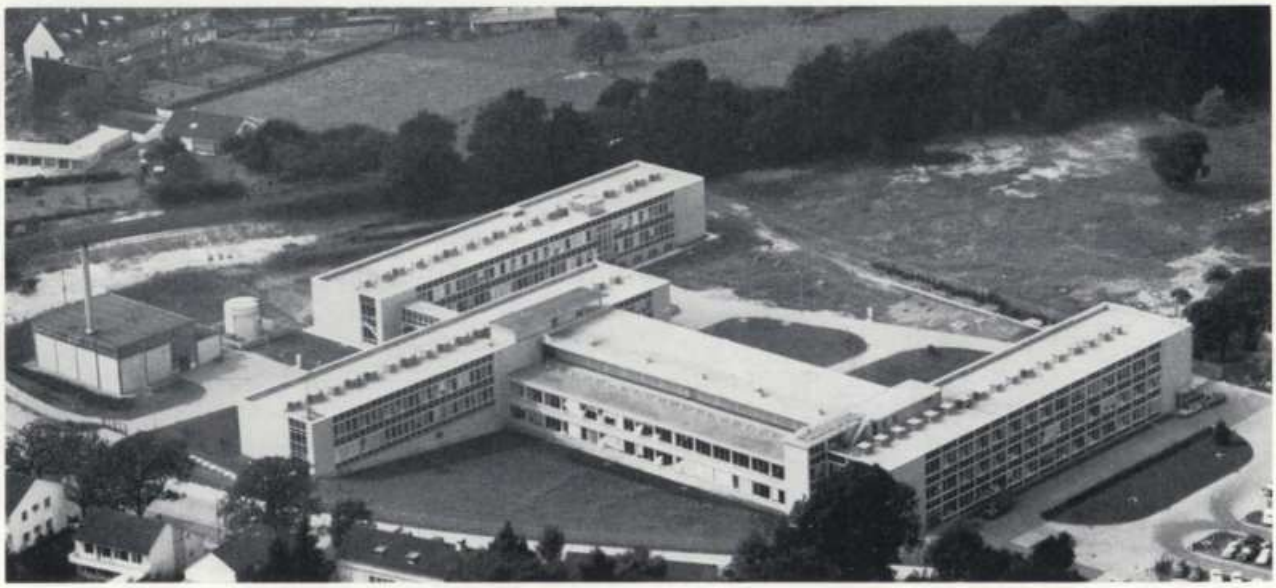
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

onderzoekingen op dit gebied afgesloten, hoewel de ontwikkelingslaboratoria vanzelfsprekend hun streven naar verdere verbetering der produkten bleven voortzetten. Het wetenschappelijk onderzoek had zich toen reeds gericht op nieuwe lampentypes, zoals b.v. gasontladingslampen en fluorescentielampen. Twintig jaar nadien bleek echter dat een aantal vraagstukken betreffende de gloeilamp nimmer geheel tot klaarheid waren gebracht, zodat het de moeite waard leek de thermische opwekking van licht opnieuw te bestuderen. Daarbij richtte het onderzoek zich vooral op de selectieve eigenschappen, zowel van het stralende lichaam als van het omhulsel van de lamp.

Voor vele Philipsprodukten is het werken met zeer lage drukken een vereiste. De vacuümtechniek met drukken van de orde van 10^{-4} tot 10^{-6} torr had men in laboratoria en fabrieken reeds onder de knie. In de periode waarin het laboratorium te Aken werd opgemaakte een diepgaande studie mogelijk van de veelvuldige wisselwerkingen tussen sporen gas en de vaste stof, zoals die b.v. in een geëvacueerd vat tussen het restgas en alle vaste delen van het systeem optreden. Een logische voortzetting hiervan leidde tot de studie van getterstoffen, welke men in afgesmolten buizen toepast ten einde de restgassen die na het leegpompen en het afsmelten van het systeem overblijven nog voor het grootste gedeelte chemisch te binden.

Het sterkst heeft zich in de elektronische industrie gedurende de laatste vijftien jaar wel de toepassing van de halfgeleiders ontwikkeld. Deze ontwikkeling werd in 1948 door de uitvinding van de transistor op gang gebracht; zij is echter geenszins tot dit bouwelement beperkt gebleven. Het is dus te begrijpen dat ook het laboratorium in Aken een bijdrage tot het halfgeleideronderzoek diende te leveren. Bij de studie der halfgeleidende elementen germanium en silicium, de belang-



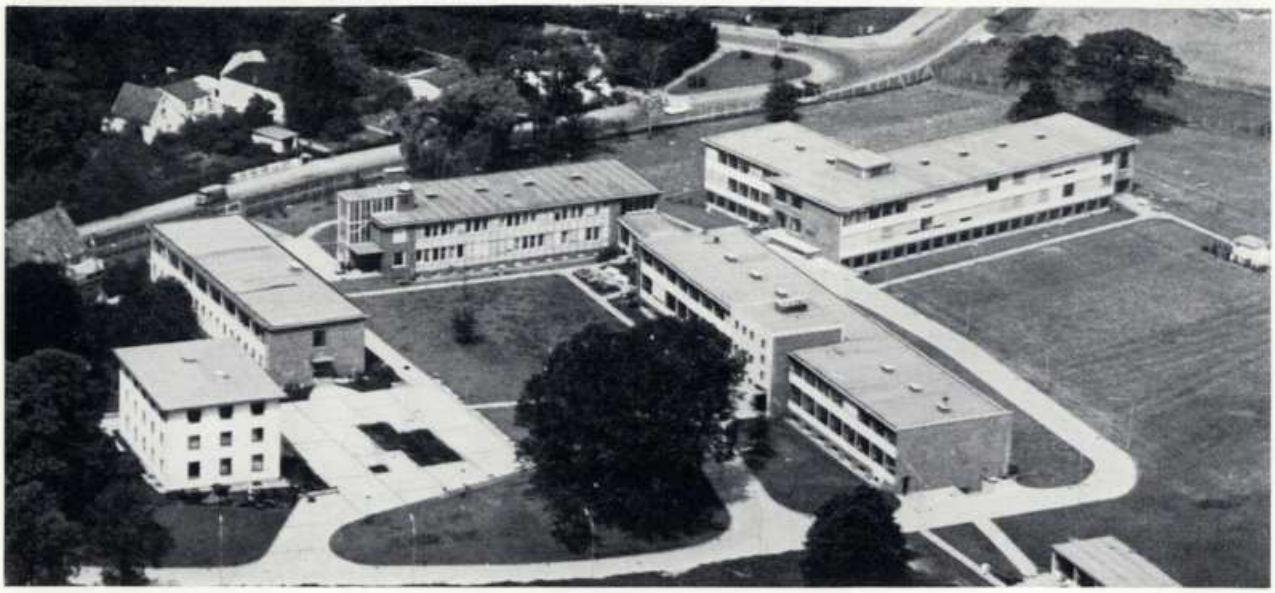
Het laboratorium te Aken. Deutsche Luftbild K.G.

richt, begon zich de behoefte aan nog aanzienlijk lagere drukken af te tekenen, en tevens leken er mogelijkheden op komst deze drukken te realiseren. Derhalve werd een onderzoek aangaande het bereiken en meten van deze extreme vacua begonnen. Hiervoor had het Eindhovense laboratorium reeds belangrijk voorbereidend werk verricht. Bij het meten van dergelijke uiterst lage drukken is het meestal niet voldoende de totale druk te kennen, maar men moet ook het een en ander weten omtrent de samenstelling van het aanwezige restgas. Het onderzoek had tot resultaat dat het op zichzelf reeds bekende omegatron tot een doeltreffend meetinstrument voor partiële drukken in het gebied tussen 10^{-5} en 10^{-11} torr kon worden ontwikkeld. De ontsluiting van het gebied van deze uiterst hoge vacua rijkste grondstoffen voor de fabricage van transistors en diodes, waren reeds verscheidene Philipslaboratoria ingeschakeld. Men besloot daarom dat men zich in Aken op de studie van halfgeleidende *verbindingen* zou toeleggen. Een der gebieden waar zulke stoffen toepassing vinden, is dat van de thermo-elektrische koeling. Zowel de fundamentele vraagstukken, met name de eigenschappen van de materialen en hun beheersing, alsook de technische ontwikkeling van thermo-elektrische koelbatterijen werden aangepakt. De resultaten hiervan konden na enige jaren met goed gevolg aan de produktiesector ter hand worden gesteld.

Een ander gebied van het halfgeleideronderzoek, dat nauw samenhangt met de opwekking van licht, is de *P-N*-luminescentie. Hieronder verstaat men de lumines-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Deutsche Luftbild K.G.

Het laboratorium te Hamburg.

centie welke in de *P-N*-overgang van een halfgeleidende diode kan optreden. Het is gebleken dat de grondstoffen die voor de vervaardiging van zulke lichtgevende diodes in aanmerking komen bijzonder moeilijk te beheersen zijn. Wij verwachten dat deze *P-N*-luminescentie niet zozeer een rol zal gaan spelen in de algemene verlichtingstechniek, doch veeleer in de zogenaamde opto-elektronica.

Op alle hierboven vermelde gebieden is een nauwe samenwerking noodzakelijk tussen scheikundigen, natuurkundigen en elektrotechnici. Zulk een samenwerking beantwoordt aan een oude en succesvolle traditie van het Eindhovense laboratorium.

Het laboratorium in Hamburg

Reeds voor de oorlog beschikte Philips in Hamburg over een klein researchlaboratorium. Dit was ondergebracht in een voormalige villa in Hamburg-Stellingen. Het lag daarom voor de hand het nieuw te stichten laboratorium op dezelfde plaats te vestigen. Daar echter de plannen voor de toekomst aanzienlijk ambitieuzer waren dan destijds, was het wenselijk een groter bouwterrein beschikbaar te hebben. Het gelukte de belendende percelen aan te kopen. In de loop van zeven jaar verrezen op het vergrote terrein een aantal nieuwe gebouwen, bestaande gebouwen werden ofwel gemoderniseerd of gesloopt, met het gevolg dat thans een modern laboratoriumcomplex aan de rand van de Hamburgse groenstrook ontstaan is. De bezetting van het Hamburgse laboratorium is thans gegroeid tot bijna 250 personen. De wetenschappelijke staf hiervan bestaat, in overeenstemming met het programma van het laboratorium, overwegend uit elektrotechnici en natuurkundigen.

Zoals reeds in de inleiding naar voren is gebracht, zou het programma voor Hamburg aldus worden opgezet dat het aansluit op bestaande produktiegebieden of tot de vervaardiging daar ter plaatse van nieuwe produkten kan leiden. Bovendien was ook gedacht aan het uitvoeren van researchopdrachten voor derden.

Als eerste grote werkterrein werd gekozen de fysica en techniek van de microgolven, zoals die voor radar en straalzenderverbindingen worden toegepast. Hoewel de bouwelementen en schakelingen hiervoor reeds in principe bekend waren, moest toch nog veel worden gedaan om de eigenschappen en het gedrag van speciale materialen bij deze hoge frequenties te onderzoeken. Het betrof hier vooral keramische magnetische materialen (ferrieten), waarvan de ontdekking te danken is aan onderzoekingen in het Eindhovense Philipslaboratorium. Juist bij microgolven kan men met zulke materialen effecten teweegbrengen die met metallieke magnetische stoffen niet mogelijk zijn. Enige jaren na de stichting begon het Hamburgse laboratorium met de vervaardiging van dergelijke materialen en schiep daarmede de voorwaarden voor diepgaande onderzoekingen. Voorts werden pogingen ondernomen om uiterst korte microgolven met behulp van buizen op te wekken.

Uit het hierboven geschetste programma vloeiden contacten voort met de fabrieken, die zich met de vervaardiging van bouwelementen voor microgolven, keramiek en elektronenbuizen bezighouden. Een belangrijk werkterrein in Hamburg is voorts de vervaardiging van transistors en diodes en hun grondstoffen germanium en silicium. Terwijl er in de fabrieken voldoende laboratoriumcapaciteit aanwezig was voor de ontwikkeling van nieuwe typen en nieuwe schakelelementen, was dit geenszins het geval voor wat betreft het onderzoek van de hoedanigheid van de oppervlakken van zulke elementen. In de beginjaren van de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

transistor had men gehoopt dat de eigenschappen van zulk een vastestof bouwelement niet zouden veranderen als functie van de tijd, in tegenstelling tot een elektronenbuis, die ten gevolge van de voor thermische emissie vereiste hoge temperatuur een eindige levensduur heeft. Het is echter in de praktijk gebleken dat ook de stabiliteit van transistors een probleem is. Hierbij speelt het oppervlak een belangrijke rol. Er werd derhalve een programma opgesteld voor fundamenteel onderzoek aangaande de oppervlakeigenschappen in het grensvlak tussen germanium of silicium en een elektrolytische oplossing.

Als tweede programmapunt in het kader van het halfgeleiderondersoek werd het gedrag van germanium onder de invloed van zeer sterke elektrische velden aangepakt. De bestudering der daarbij optredende hete elektronen in germanium heeft aanzienlijk tot het inzicht in de inwendige elektronische structuur van dit element bijgedragen.

Een derde groep onderwerpen omvat het meten en regelen van industriële processen met elektronische hulpmiddelen. De toepassingsmogelijkheden van de elektronentechniek op dit gebied zijn legio. De digitale techniek, die voor elektronische rekenmachines ontwikkeld is, wordt in allerlei varianten ook hier toegepast. Een gedeelte van de desbetreffende werkgroep houdt zich dan ook bezig met de vraag op welke wijze digitale schakelingen voor het realiseren van de meest uiteenlopende meet- en regelprocessen kunnen worden aangewend.

Ten slotte wilde Philips zich ook op het steeds belangrijker wordende terrein van de elektronische rekenmachines niet onbetuigd laten. Het spectrum van de hiervoor vereiste technische en wetenschappelijke kennis is zo breed dat op dit gebied alle in aanmerking komende krachten binnen het concern gecoördineerd moeten werken. In dit kader werd aan het Hamburgse laboratorium de taak toebedeeld de elektromechanische problemen te bestuderen, in het bijzonder de ontwikkeling van de zg. invoer- en uitvoerorganen.

Het researchprogramma van Philips Zentrallaboratorium GmbH

H. Bruining en S. Duinker

001.891:62.001.5

Inleiding

In het voorafgaande artikel van A. E. Pannenborg is in grote lijnen uiteengezet op welke researchgebieden onze laboratoria in Aken en Hamburg, overeenkomstig de in de eerste jaren opgestelde taakverdeling, werkzaam zijn. De in het kader van dit researchprogramma uitgevoerde onderzoekingen verschillen aanmerkelijk zowel wat betreft aard als wat betreft onderwerp. Wat betreft de aard der onderzoekingen, kunnen we globaal van vier categorieën spreken. Enerzijds worden problemen aangepakt die tot de *fundamentele research* behoren, met als doel een beter inzicht te verkrijgen op bepaalde gebieden der natuurkunde, scheikunde en elektrotechniek. Andere onderzoekingen zijn gericht op de beheersing van de *technologie* van een grote verscheidenheid van nieuwe grondstoffen, preparaten en schakelelementen. Weer een andere groep van werkzaamheden houdt verband met de *toepassing* van deze grondstoffen en preparaten in de meest uiteenlopende elektrische, elektronische en mechanische toestellen en installaties. Ten slotte wordt, als andere uiterste in het spectrum van activiteiten, een grondige studie gemaakt van sommige in nauw verband met de praktijk staande vraagstukken, waarvoor men met behulp van nieuwe technische middelen een oplossing moet vinden. Wat betreft de verscheidenheid der *onderwerpen*, geldt uiteraard dat het researchprogramma van Philips moet passen bij het werkterrein van het concern in heel zijn uitgebreidheid, met als hoofdpijlers de toonbankartikelen, de onderdelen en de professionele installaties.

Gezien deze grote verscheidenheid in het verrichte researchwerk, streeft men er vanzelfsprekend naar, tot een zo vruchtbaar mogelijke wederzijdse beïnvloeding van de verschillende soorten werk te geraken. Dit is alleen daarom reeds noodzakelijk, omdat zeer dikwijls de probleemstelling van een bepaalde researchgroep in hoge mate mede wordt bepaald door de resultaten of de behoeften van andere groepen. Als voorbeeld hiervan

Dr. H. Bruining, directeur van het laboratorium Aken van Philips Zentrallaboratorium GmbH. Prof. dr. ir. S. Duinker, directeur van het laboratorium Hamburg van Philips Zentrallaboratorium GmbH, tevens buitengewoon hoogleraar aan de Universiteit Groningen met een leeropdracht voor Elektrotechniek.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zou men een groep kunnen noemen die tot taak heeft fysische verschijnselen in nieuwe materialen te benutten voor de conceptie van een nieuw type bouwelement. Daarbij zal van den beginne aan voldoende rekening gehouden moeten worden met vele gezichtspunten en eisen die eigen zijn aan de potentiële toepassingsgebieden van deze bouwelementen. Het is wel duidelijk dat voor het uitvoeren van zulk een programma een goede coördinatie en samenwerking tussen de verschillende researchgroepen binnen het laboratorium en binnen het concern van het grootste belang zijn, wil men de voornaamste doelstelling van industriële research, namelijk het consolideren van bestaande en het ontsluiten van nieuwe werkgebieden van het concern, recht doen wedervaren.

Als inleiding tot de in dit nummer verzamelde bijdragen van medewerkers van onze beide laboratoria willen wij hier trachten het reeds in het artikel van A.E. Pannenborg geschetste researchprogramma wat nader te omlijnen en hierbij ook iets van de bovenvermelde verbanden tussen de verschillende categorieën van onderzoekingen uit te laten komen. Het is in dit verband nuttig het werk in twee hoofdstukken te groeperen. Het eerste omvat het onderzoek van de vaste stof, waartoe vastestoffysica en vastestofchemie en hun toepassingen in de elektrotechniek en elektronentechniek behoren. Het tweede hoofdstuk draagt als titel „Systeemresearch" en omvat voornamelijk de meet- en regeltechniek, de informatieverwerking en hiermede samenhangende vraagstukken.

Onderzoek van de vaste stof

Het is algemeen bekend dat de elektrotechniek haar ontwikkeling voor een belangrijk deel te danken heeft aan het feit dat er metalen, legeringen of, meer algemeen, grondstoffen met speciale, soms zelfs extreme eigenschappen bestaan. Het goede geleidingsvermogen van koper en de magnetische eigenschappen van ijzer zijn hiervan voorbeelden. De grote vooruitgang van de laatste decennia en de nieuwe mogelijkheden die zich in die jaren geopenbaard hebben, waren ondenkbaar geweest als men niet had kunnen beschikken over materialen met zulke interessante eigenschappen. Voor een onderneming als Philips, met een veelzijdige activiteit op het gebied van de elektrotechniek en van de elektronentechniek, is een verdere ontplooiing slechts dan mogelijk wanneer het zoeken naar nieuwe produkten en nieuwe mogelijkheden wordt gesteund door een intensieve research op het gebied van de vaste stof. Enerzijds kan de research impulsen ontvangen doordat men bestaande produkten wil verbeteren of een bepaald nieuw produkt wil ontwikkelen, anderzijds kan een toevallig ontdekte eigenschap of een nieuw verschijnsel de aanleiding vormen tot de schepping van een geheel onverwacht nieuw produkt. De verschillende in dit nummer verzamelde bijdragen geven hiervan een duidelijk beeld.

Wil men een stof, b.v. een nieuwe halfgeleider, in de techniek gebruiken, dan dient men de stof als zodanig te beheersen. Men dient hem in zuivere toestand te kunnen bereiden en bovendien in een vorm waarin hij geschikt is voor het experiment of de toepassing, b.v. als monokristal, in gesinterde vorm, of als dunne laag. Deze beheersing van de stof vormt een essentieel bestanddeel van het werk, niet alleen omdat men het object, waarvan de fysische eigenschappen uiteindelijk de toepassing zullen bepalen, dient te kennen, doch ook omdat men in geval van een mogelijke latere toepassing slechts dan tot een reproduceerbaar resultaat kan komen wanneer de samenstelling en het bereidingsproces nauwkeurig bekend zijn.

Uit het oogpunt van deze beheersing van de stof is ook het belang duidelijk van de onderzoekingen over het bereiken en toepassen van uiterst hoge vacua. Een dunne laag, waarvan men de structuur en samenstelling in vele gevallen nauwkeurig dient te kennen, kan slechts dan reproduceerbaar worden vervaardigd wanneer het vacuüm voldoende hoog of de gasatmosfeer voldoende bepaald is. De dunne laag, waaronder wij een laag ter dikte van 1 à 1000 atomen verstaan, zal in de techniek van de toekomst van grote betekenis blijken te zijn. Voor het produceren van nauwkeurig bepaalde lagen van dit soort zijn vacua tot een druk van 10^{-9} torr of nog lager dikwijls noodzakelijk.

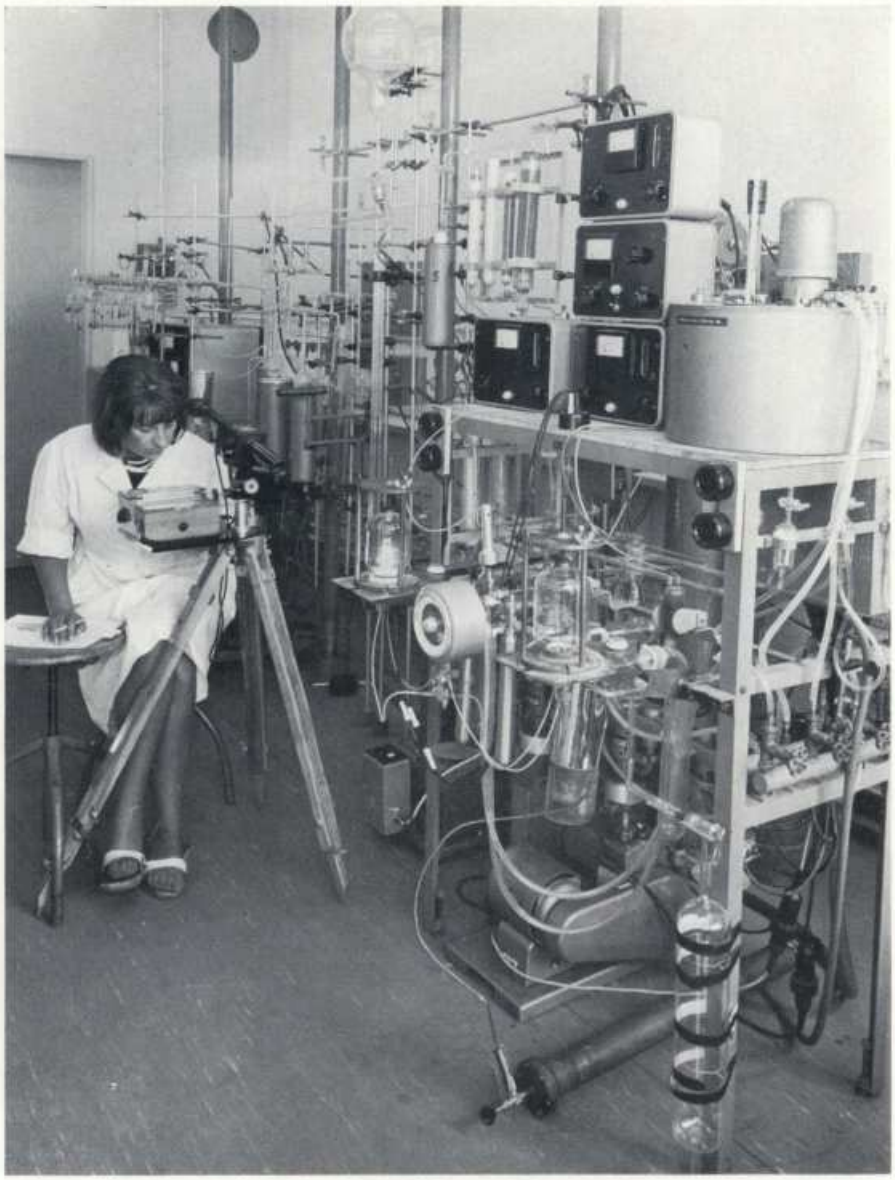
De beheersing van het materiaal is bijzonder ver gevorderd bij de halfgeleidende elementen germanium en silicium. Hieruit kan men heden de meest volmaakte en zuiverste synthetische monokristallen vervaardigen. Daarentegen weet men betrekkelijk weinig van het oppervlak van dergelijke kristallen. Gewoonlijk zijn hieraan vreemde stoffen op zijn minst in een monoatomaire laag geadsorbeerd; deze stoffen kunnen de eigenschappen van het schakelingselement dat van de halfgeleider is gemaakt beïnvloeden. Deze invloed is des te sterker merkbaar naarmate men een kleiner kristal heeft, dus in het bijzonder bij miniatuur-elementen. Voor het fundamentele onderzoek zijn tot dusver slechts proeven met opstellingen vruchtbaar gebleken waarbij de omstandigheden aanzienlijk afwijken van die waarin het technische schakelingselement verkeert, nl. met opstellingen waarbij het kristaloppervlak wordt ondergedompeld in een vloeistof, bij voorkeur water [1]. Wordt de geadsorbeerde laag van de vreemde stoffen dikker dan monoatomair — hetgeen vrijwel altijd het geval is —, dan wordt ten slotte een afzonderlijke faze (in thermodynamische zin) gevormd, een deklaag, die allereerst onderzocht dient te worden. Hierbij kunnen optische methodes van onderzoek zeer nuttig zijn. Zo

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kan men door metingen van de lichtabsorptie de chemische samenstelling van de deklaag bepalen. Deze metingen zijn reeds in het nabije infrarood mogelijk, aangezien germanium en silicium straling in dit spectrale gebied doorlaten.

De gloeilamp is het oudste Philipsprodukt. De gloeidraad hiervan is een typisch geval waarin de te gebruiken materialen aan een hele reeks van extreme eisen dienen te voldoen. De wet van Wien eist een zo hoog mogelijke temperatuur, opdat het stralingsmaximum zover mogelijk naar het zichtbare gedeelte van het spectrum verschoven wordt en tevens de emissie in het infrarood relatief daalt. De te gebruiken materialen dienen dus een zo hoog mogelijk smeltpunt en een lage dampspanning te bezitten en zoveel mogelijk selectief in het zichtbare deel van het spectrum te stralen. De beide eerstgenoemde eisen beperken de keuze dusdanig dat men sinds meer dan vijftig jaar vrijwel uitsluitend wolfraam gebruikt. Het is echter mogelijk het verdampte metaal door middel van een kringproces naar het gloeilichaam terug te voeren. De halogenen zijn een daartoe geschikt transportmiddel, en daarvan biedt met name fluor interessante perspectieven [2]. Door geschikte kringprocessen te gebruiken, zou men, daar de verdamping vrijwel gecompenseerd wordt, minder beperkt zijn in de keuze van het materiaal voor de gloeidraad.



Kijkje in een der fluor-werkkamers van het laboratorium te Aken.

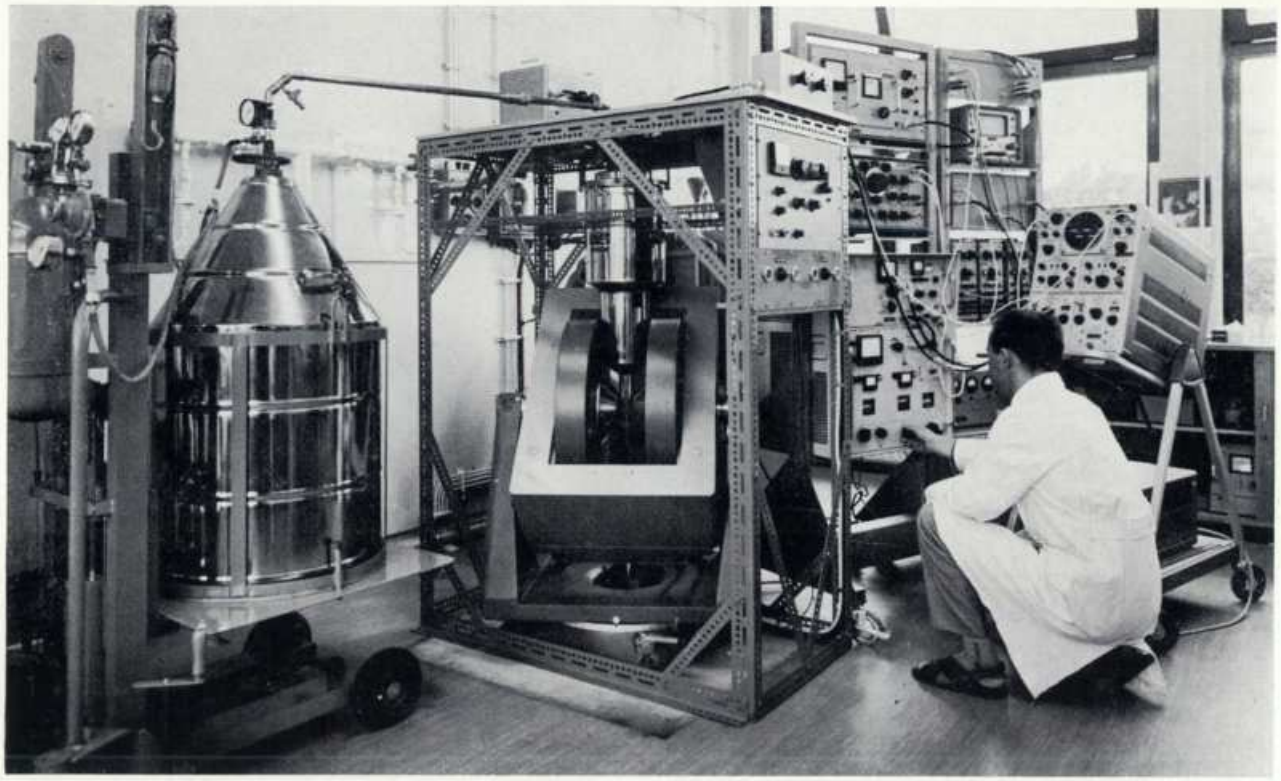
Het terugvoeren van het opgedampte metaal naar het gloeilichaam is in wezen een deel van een chemische transportreactie. Ook voor het vervaardigen van dunne lagen en van zuivere materialen in polykristallijne of monokristallijne vorm bieden transportreacties interessante mogelijkheden [3].

Voor het fundamentele onderzoek zijn voorts die verschijnselen interessant die niet zonder meer met behulp van klassieke voorstellingen verklaard kunnen worden. Hiertoe behoren vele wisselwerkingen tussen elektronen, licht en akoestische quanta, vooral dezulke die onder extreme fysische omstandigheden, zoals zeer sterke magnetische of elektrische velden, zeer lage temperaturen, enz., plaatsvinden en die met de verzamelnaam „transportverschijnselen" aangeduid worden [4]. Het zou ons te ver voeren op deze plaats

[1] H. U. Harten, R. Memming en G. Schwandt, Onderzoekingen aan het grensvlak van germanium en water, blz. 294 van dit nummer.
[2] J. Schröder, Voorbeelden uit de fluorchemie en mogelijke technische toepassingen; blz. 277 van dit nummer.
[3] A. Rabenau, Chemische transportreacties; blz. 283 van dit nummer.
[4] K. J. Schmidt-Tiedemann, Transportverschijnselen in de vaste stof; blz. 264 van dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Opstelling in het laboratorium te Hamburg voor het onderzoek van de wisselwerking tussen elektronenstromen en akoestische golven in de vaste stof.

nader in te gaan op de grote verscheidenheid van fysische methodes die in onze laboratoria ten behoeve van het onderzoek der transportverschijnselen worden toegepast. Wij vermelden slechts de optische onderzoekingen alsmede de anisotropiemetingen van het elektrisch geleidingsvermogen. Voorts wijzen wij nog op een minder bekende methode, nl. de meting van de voortplantingseigenschappen van ultrasone trillingen (van 50 kHz tot 3 GHz) in de vaste stof. Hieruit kan men o.a. gegevens over de beweeglijkheid der elektronen verkrijgen. Ook andere wisselwerkingen, b.v. met roosterfouten, kunnen op deze wijze worden bestudeerd. Dergelijke onderzoekingen hebben b.v. ertoe geleid dat een versterker voor ultrasone trillingen kon worden gemaakt die werkt volgens het lopendegolfprincipe.

De optische metingen aan metalen en halfgeleiders zijn enerzijds een middel om meer kennis van de fysische eigenschappen te verkrijgen, anderzijds zijn ze van bijzonder belang voor het toepassingsgebied van de lichtopwekking. De meeste lichtbronnen emitteren behalve in het zichtbare gedeelte van het spectrum ook in aanzienlijke mate in het infrarood; dit laatste betekent verlies aan energie. Daar bepaalde stoffen een selectieve reflexie vertonen, in die zin dat zij het zichtbare licht zonder grote absorptieverliezen doorlaten doch het infrarood grotendeels terugkaatsen, bestaat de mogelijkheid het lichtrendement van lichtbronnen te verhogen door de ballons te bedekken met zeer dunne lagen van dergelijke stoffen. Een toepassing van dergelijke lagen bij natriumdamplampen resulteerde in een zeer belangrijke verbetering van het lichtrendement [5].

In aansluiting hierop kunnen wij melding maken van de in het kader van ons researchprogramma ondernomen studie van de *P-N*-luminescentie, daar het immers ook daarbij een opwekking van licht betreft. In het bijzonder is galliumfosfide bestudeerd: dit is het eerste bekende materiaal dat bij kamertemperatuur een voor de praktijk interessant quantumrendement oplevert (tot 1%). GaP en andere III-V-verbindingen zijn bovendien fotogeleiders. Door elektroluminescerend GaP te combineren met fotogeleidende materialen, zijn zg. opto-elektronische schakelingen mogelijk. Wat de toepassing betreft, bevindt zich deze interessante nieuwe soort schakelingstechniek nog in het ontwikkelingsstadium; enige mogelijkheden worden vermeld in een der bijdragen tot dit nummer [6]. Bij de huidige stand van de techniek komt het gebruik van de *P-N*-luminescentie voor verlichtingsdoeleinden nog niet in aanmerking. Wel kan men nu reeds aan een toepassing als lichtbron voor indicatiedoeleinden denken.

Als voorbeeld van een stof die onverwachts een nieuw verschijnsel vertoonde, kunnen wij bariumtitanaat noemen, een materiaal dat reeds lang als diëlektricum in condensatoren wordt gebruikt en daarenboven

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ook interessante piëzo- en ferro-elektrische eigenschappen bezit. Het nieuwe verschijnsel bestaat uit een bijna sprongsgewijze toeneming van de (door doteringen verlaagde) elektrische weerstand in een klein temperatuurtraject. Binnen dit overgangsgebied bezit bariumtitanaat de grootste tot dusver bekende temperatuurcoëfficiënt van de weerstand. Aan het hier verrichte onderzoek omtrent mogelijke toepassingen werd tevens een studie gekoppeld die tot een meer gedetailleerde voorstelling van het mechanisme van het verschijnsel heeft geleid [7].

Systeem-research

Bij een aantal hierboven genoemde onderzoekingen was het begonnen om nieuwe of verbeterde materialen en onderdelen, of om verbeterde methodes om deze te vervaardigen. Zulke onderzoekingen scheppen nieuwe mogelijkheden voor toepassingen die vooralsnog onbekend zijn. De onderzoekingen daarentegen die we tot de categorie van de „systeem-research" rekenen, hebben als doel, beschikbare nieuwe technische principes en mogelijkheden te benutten voor toepassing in technische systemen. Onder „systeem" mogen in dit verband zowel betrekkelijk kleine apparaten worden verstaan, b.v. elektronische meetinstrumenten, alsook omvangrijke elektronische installaties. Voorbeelden van deze laatste soort zijn inrichtingen voor de transmissie van microgolven, installaties voor meet-, regel- en stuurprocessen in de industrie, of installaties voor informatieverwerking in de administratieve, commerciële, technische of wetenschappelijke sector. Het is dus kenmerkend voor deze categorie van research dat de doelstelling in eerste instantie wordt bepaald door in de praktijk bestaande problemen. Een diepgaande studie van deze praktische problemen zelf kan als een eerste stap naar het formuleren van de researchtaken worden beschouwd. Als volgende stap dient men te bezien of en in hoeverre men, gebruik makend van het gegeven inzicht in het systeem en van de beschikbare bouwelementen, aan de gestelde eisen optimaal en in overeenstemming met de huidige stand van de techniek kan voldoen.

Uitgaande van de beschikbare magnetische materialen ferroxcube en ferroxdure, zijn een reeks onderzoekingen in het gebied der zeer hoge frequenties gedaan, die o.a. voor de ontvangst van metergolven en voor radar van essentieel belang zijn. De vraag naar een „kleine" antenne voor FM-ontvangst (d.w.z. een antenne die kleiner is dan de te ontvangen golflengte) heeft tot de ontwikkeling van ferrietantennes, de zg. magnetische antennes, geleid. In het microgolvengebied kan men met ferrieten aanzienlijke, elektrisch regelbare, fazeverschuivingen tussen signalen in verschillende delen van een systeem teweegbrengen. Dit gaf de stoot tot een onderzoek over de principiële mogelijkheid om het stralingsdiagram van een microgolfantenne met magnetische middelen te draaien. Hiermee hangen nauw samen de onderzoekingen over het gedrag van ferrietfazedraaiers bij dusdanig hoge impulsvermogens dat ook niet-lineaire effecten een belangrijke rol beginnen te spelen. Een andere interessante toepassingsmogelijkheid voor ferrieten is de stabilisatie van het uitgangsvermogen van een klystron met behulp van een elektrisch gestuurde ferrietverzwakker.

Ook op het gebied der millimetergolven, waar voor het opwekken en voortplanten van de golven naar principieel nieuwe technieken en mogelijkheden moet worden gezocht, zijn er voor de research nog ettelijke belangrijke taken. Het werk in het laboratorium te Hamburg heeft zich tot dusver o.a. beziggehouden met de voortplanting van mm-golven langs diëlektrische leidingen, met de ontwikkeling van een frequentiestandaard voor mm-golven, en met de mogelijkheid golven met frequenties boven 300 GHz op te wekken door frequentievermenigvuldiging met behulp van niet-lineaire veldemissie. Interessant is ook een supergeleidende resonator van uitzonderlijk hoge kwaliteit, die hier in het kader van dergelijke onderzoekingen ontwikkeld is.

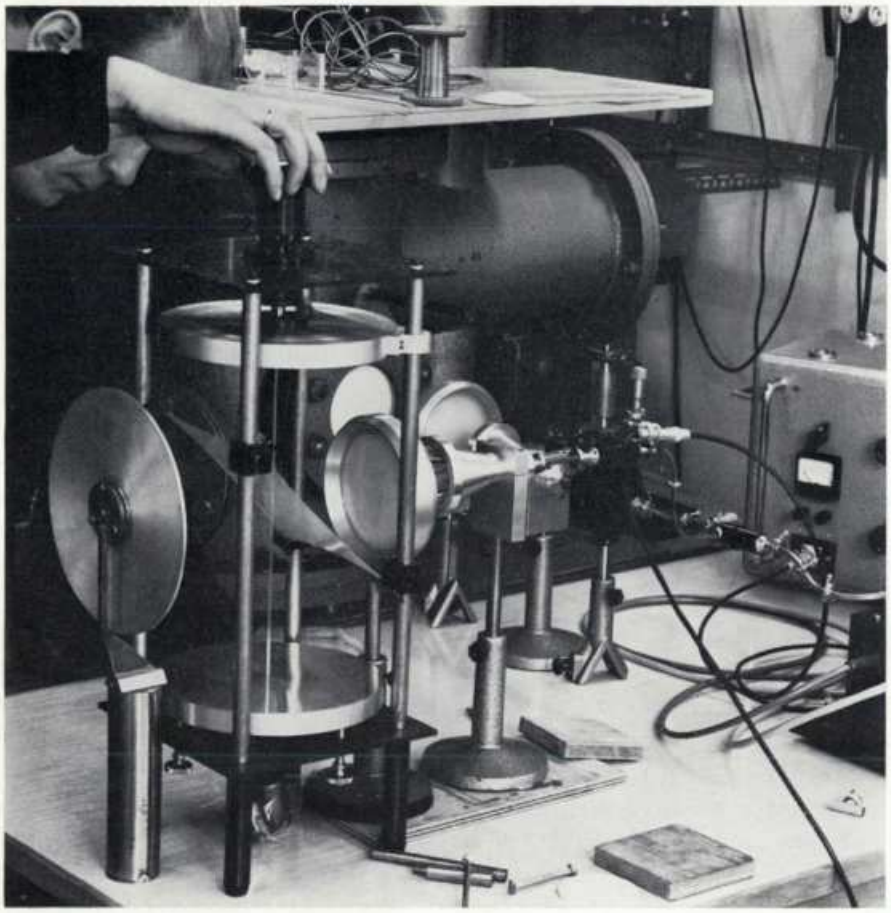
Als volgend voorbeeld van systeem-research mogen hier worden vermeld onze experimenten op het gebied van de invoer- en uitvoerorganen van installaties voor informatieverwerking. De elektronische informatieverwerking heeft de laatste twintig jaar een enorme ontwikkeling te zien gegeven en begint thans in de meest uiteenlopende werkgebieden vaste voet te krijgen. Daar de berekeningen en bewerkingen die met de informatie moeten worden uitgevoerd — ongeacht de grote verschillen in het eigenlijke doel — zich beperken tot enkele fundamentele rekenoperaties, zoals optellen en vermenigvuldigen, kan men in principe een rekenmachine ontwerpen die in staat is vraagstukken van uiteenlopende soort op te lossen. Om echter een dergelijke universele rekenmachine voor een bepaald soort problemen te kunnen gebruiken, heeft men een reeks hulptoestellen nodig die de te verwerken informatie verzamelen, sorteren, controleren en ze in een voor de machine verwerkbare vorm te zamen met het rekenprogramma aan de machine toevoeren. Aan de uitvoerzijde moeten de verkregen uitkomsten in de gewenste vorm, b.v. gedrukt of getekend, afgeleverd worden. Het is duidelijk

---

[5] R. Groth en E. Kauer, Warmte-isolatie van natriumlampen; blz. 270 van dit nummer.
[6] H. G. Grimmeiss, W. Kischio en H. Scholz, Lichtbronnen en fotocellen van galliumfosfide; blz. 303 van dit nummer.
[7] E. Andrich en K. H. Härdtl, Onderzoekingen aan halfgeleiders van $BaTiO_3$; blz. 285 van dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



In het laboratorium te Hamburg ontwikkelde apparatuur voor de transmissie en meting van millimetergolven.

dat, naar gelang van het toepassingsgebied, de uitvoering van deze taken een hele reeks verschillende toestellen (randapparatuur) vereist. Een der bijdragen in dit nummer gaat uitvoerig in op de algemene overwegingen betreffende deze randapparatuur en op de huidige ontwikkelingstendensen [8].

Het bepalen van de optimale codering voor foutloze transmissie van informatie of ter vermijding van inleesfouten is een kwestie van wiskunde; het op grond van deze wiskundige kennis con cipiëren van een toestel ter verwezenlijking van een bepaalde restfout-waarschijnlijkheid daarentegen vormt een schakelingstechnisch probleem [9]. De invoer van de informatie in de machine geschiedt dikwijls door middel van ponsband. Deze wordt langs een b.v. foto-elektrisch werkend inleesorgaan gevoerd. Ten einde de informatieverwerking te versnellen, tracht men de inleessnelheid zo hoog mogelijk op te voeren, echter op voorwaarde dat de ponsband op elk ogenblik vóór het bereiken van het volgende teken gestopt kan worden. Dit leidt tot interessante elektromechanische problemen, waaraan hier wordt gewerkt.

Een soortgelijke problematiek vindt men aan de uitvoerzijde van een informatieverwerkende installatie. Ter verhoging van de doorstroomsnelheid van de informatie, b.v. bij de uitvoer per ponsband, tracht men de ponssnelheid te vergroten. Ten einde aanzienlijk hogere ponssnelheden te bereiken dan mogelijk is met het door de massatraagheid begrensde mechanisch ponsen, kan men trachten van andere fysische principes gebruik te maken. Een dergelijk alternatief is het ponsen met behulp van een door een vonkontlading opgewekte schokgolf. Het eigenlijke ponsen gebeurt dan in enkele microseconden.

In de regel wordt de informatie uitgelezen in normaal machineschrift, dikwijls met enige doorslagen. Om hogere druksnelheden te bereiken, kan men overgaan tot de elektrostatische elektrografie. Er werd hier een onderzoek ingesteld aangaande de daartoe vereiste eigenschappen van de informatiedrager. Een geheel andere methode van sneldrukken, die wederom gebruik maakt van de energie van schokgolven, wordt in de reeds aangehaalde bijdrage [8] behandeld.

Voor het elektronische gedeelte van deze randapparatuur moeten telkens nog vele schakelingstechnische problemen worden opgelost. Ten behoeve van het onderzoek aan in- en uitvoerorganen werd hier een impulsgenerator ontwikkeld waarmede de meest uiteenlopende impulspatronen kunnen worden opgebouwd, die voor de afzonderlijke toestellen van de randapparatuur van belang zijn.

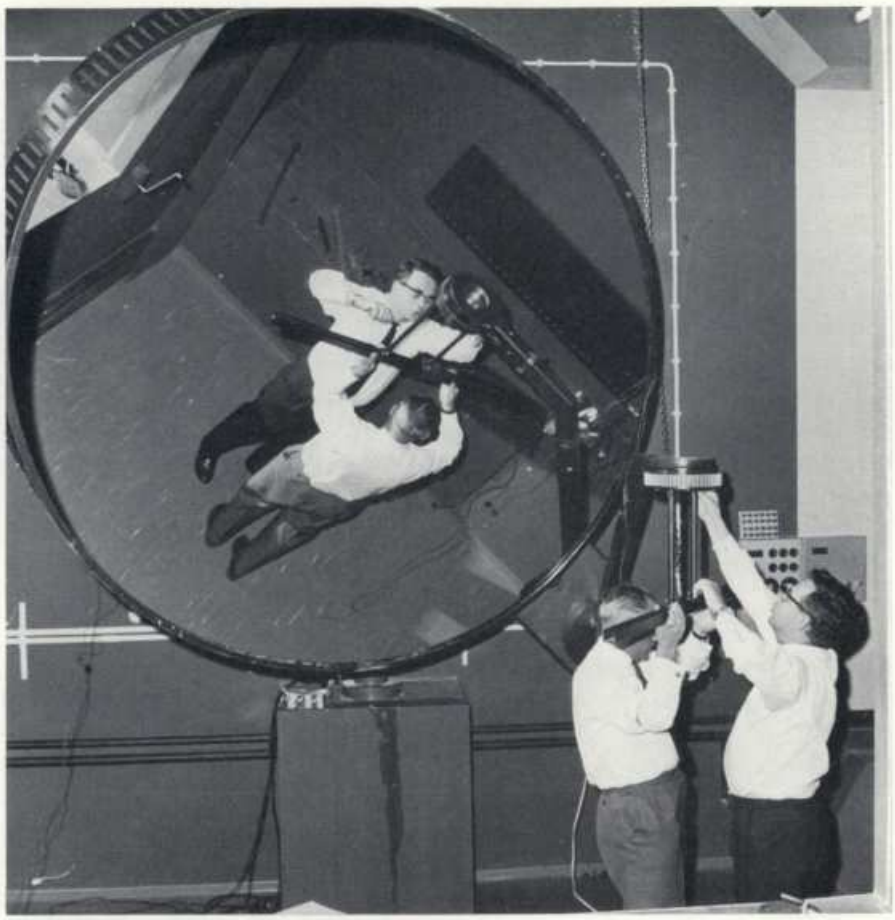
Op het gebied van de industriële meet- en regeltechniek treffen we weer een groot aantal andere vraagstukken aan, die een fundamenteel en dus tot de taak van het researchlaboratorium behorend onderzoek vereisen. In feite betreft het hier een technisch gebied dat,

[8] G. Haas, Problemen en ontwikkelingstendensen van de randapparatuur bij informatieverwerking; blz. 314 van dit nummer.
[9] G. Renelt en J. Schröder, Beveiliging van informatie bij invoer en transmissie met behulp van één of twee controletekens; blz. 323 van dit nummer.
[10] D. Gossel, G. Kaps en W. Schott, Een nieuw systeem van digitale bouwstenen voor industriële meet- en regelapparatuur; blz. 331 van dit nummer.
[11] D. Gossel, Het digitaal voortbrengen van muzikale toonintervallen; blz. 338 van dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

in tegenstelling tot de informatieverwerking, reeds op een lange geschiedenis kan terugzien. Er is echter geen sprake van dat de ontwikkeling hier een eindfaze zou hebben bereikt. Integendeel, de eisen die thans op dit terrein worden gesteld wat betreft automatisering, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid, en het feit dat men ook hier in toenemende mate te maken krijgt met een combinatie der meet- en regelprocessen met digitale rekenmachines die het industriële proces sturen, hebben een gehele reeks zeer belangwekkende problemen doen ontstaan, die bij het meten en regelen op basis van de analogon-techniek in het geheel niet voorkomen. Dit betekent geenszins dat nu de analogon-techniek in elk geval als geheel verouderd zou moeten worden beschouwd. Speciaal waar het systemen van beperkte omvang betreft, en waar de kosten een grotere rol spelen dan de snelheid, zal de analogon-techniek haar waarde behouden, zodat in onze laboratoria het werk in beide richtingen wordt voortgezet.



Draaispiegel van het lichttechnische laboratorium in het laboratorium te Aken. Hiermee wordt de lichtverdeling van armaturen gemeten.

De analyse van een groot aantal verschillende industriële processen leidde tot een systeem-filosofie op basis van een nieuw systeem van digitale bouwelementen, waarvan men een korte beschrijving in dit nummer aantreft [10]. Wegens de principiële verschillen tussen de primaire eisen in de informatieverwerking enerzijds en in de meet- en regeltechniek anderzijds, zijn hier verschillende gezichtspunten van toepassing, zodat de resultaten uit een dezer gebieden soms niet zomaar voor het andere te gebruiken zijn. De bewering dat bij systeem-research op een bepaald gebied soms onverwachte oplossingen voor geheel andere toepassingsgebieden gevonden kunnen worden, werd hier weer eens bevestigd: als verrassend nevenresultaat van de vermelde onderzoekingen ontstond een digitaal stemtoestel, waarmede men op uiterst eenvoudige wijze een piano of orgel gelijkzwevend kan stemmen [11].

Evenals bij de informatieverwerking, speelt ook in de meet- en regeltechniek de randapparatuur een grote rol. Deze omvat hier enerzijds de toestellen die de te meten fysische grootheden vertalen in een analoog of digitaal elektrisch signaal, en anderzijds de regelorganen die, gestuurd door elektrische signalen, in een proces ingrijpen. Ook van het onderzoek op dit gebied mogen enige voorbeelden worden vermeld. Voor het meten van rek, waartoe ook b.v. velerlei krachtmetingen zijn te herleiden, speelt het rekstrookje een belangrijke rol. De ontwikkeling der halfgeleiders leidde tot nieuwe types halfgeleidende rekstrookjes. De studie der toepassingsmogelijkheden van aan één zijde vastgeklemde veren leidde tot een methode om infrarode straling te moduleren. Voor het uitwerken van dergelijke problemen is gecoördineerd mechanisch, fysisch en elektrotechnisch werk noodzakelijk. Dit kwam wel zeer duidelijk naar voren bij het ontwikkelen van een methode voor het continu meten van een vloeistofdichtheid met behulp van mechanische trillingen. Ook een nulpuntsthermostaat, waarbij op elegante wijze van het Peltier-effect gebruik wordt gemaakt, en een lichtsonde voor verplaatsingsmeting zonder aanraking in het microngebied kan men rekenen tot de categorie van de randapparatuur. Bij al dit werk is de research voornamelijk gericht op het vinden van nieuwe meetprincipes.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Van ons werk op het gebied van de regelorganen vermelden wij hier een onderzoek over een gesynchroniseerde inductiemotor, waarbij door toepassing van elektronische middelen op het gebied der elektrische machines nieuwe mogelijkheden werden gevonden voor de regeling van motoren. Andere interessante mogelijkheden op het terrein der kleine elektromotoren hebben wij te danken aan de nieuwe ferrietmaterialen, die door hun grote soortelijke weerstand en hun mechanische eigenschappen in bepaalde gevallen ook bij lage frequenties superieur zijn aan de gebruikelijke metallieke magnetische materialen, ondanks hun kleinere permeabiliteit en lagere magnetische verzadiging. Zo is het gelukt, met een rotor van een hardmagnetisch ferrietmateriaal een zelfaanlopende synchrone motor zonder collector te construeren, die interessante mogelijkheden biedt voor gebruik in droogscheerapparaten en grammofoons [12].

In een deel van het Philips Zentrallaboratorium te Aken is thans ook een laboratorium voor verlichtingstechniek ondergebracht. Dit laboratorium heeft tot taak de grondbeginselen voor de optimale toepassing van lichtbronnen en armaturen in de praktijk te bestuderen. Op de voorgrond staan hierbij de wisselwerkingen tussen licht en waarnemingscondities alsmede de consequenties hiervan voor het ontwerp van armaturen. Op het gebied van de lichtmeting werden speciale installaties ontwikkeld, ten einde het gedrag van lampen, armaturen en materialen te kunnen bestuderen.

[12] R. Thees, Kleine elektromotoren; blz. 309 van dit nummer.

Transportverschijnselen in de vaste stof

K. J. Schmidt-Tiedemann

537.311.33

Inleiding

Onder „transportverschijnselen" verstaat de natuurkundige de samenhang tussen stromen en krachten in de ruimste zin van het woord. Eenvoudige voorbeelden hiervan zijn het vloeien van een elektrische stroom ten gevolge van een potentiaalverschil, warmtegeleiding ten gevolge van een temperatuurverschil of diffusie als gevolg van een concentratieverschil.

De werking van elk schakelingselement uit de halfgeleidertechniek berust op een of meer transportmechanismen, en men kan de taak van een ontwikkelingsingenieur dan ook ruwweg omschrijven als het trachten een zodanige combinatie van transportverschijnselen te vinden en te verwerkelijken, dat deze op grond van de natuurlijke samenhang der afzonderlijke verschijnselen het nagestreefde technische doel het best benadert. Hoe dieper onze fundamentele kennis der transportverschijnselen gaat, des te vlotter en eleganter kan men dit doel bereiken. Hieruit blijkt hoe uiterst belangrijk fundamenteel onderzoek op het gebied van de natuurkunde van de vaste stof voor ons is.

Dr. K. J. Schmidt-Tiedemann is medewerker van het laboratorium Hamburg van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

Hoe men een gecompliceerd technisch vraagstuk door gebruik te maken van een geschikte natuurwet als het ware „vanzelf" kan oplossen, zullen wij in het volgende aan de hand van twee voorbeelden verduidelijken.

Bezien wij allereerst het dikwijls in de elektronische meettechniek voorkomende probleem hoe een elektrische stroom in een zeer groot interval overal met dezelfde relatieve nauwkeurigheid te meten. Een inrichting die zulks mogelijk maakt, een zg. logaritmische versterker, kan verwezenlijkt worden door gebruik te maken van de verdelingswet van Stefan-Boltzmann. Deze wet verzekert, althans binnen bepaalde grenzen, een zuiver logaritmisch verband — b.v. tussen stroom en spanning van een diode. Het technische probleem, te weten: het elimineren van storende invloeden (zoals lekstromen en dergelijke), kan zeer fraai opgelost worden door een geschikte vorm van tegenkoppeling toe te passen [1]. Hierdoor bereikt men b.v. een relatieve meetnauwkeurigheid van 1 % in een interval van 1 tot 10 miljard ($1 : 10^{10}$). In de relatie tussen de te meten stroom en het uitgangssignaal komen, behalve de temperatuur — die uiteraard voldoende constant gehouden moet worden —, slechts de beide natuurconstanten e

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en k voor, dat zijn resp. de lading van het elektron en de constante van Boltzmann. Houdt men, omgekeerd, de stroom constant, dan hangt het uitgangssignaal op een nauwkeurig bekende wijze van de temperatuur af en werkt het apparaat als elektronische thermometer.

Als tweede voorbeeld kiezen we een ontvanger voor infrarode straling. Als bij een halfgeleider de elektrische weerstand afhangt van de sterkte van de opvallende straling, vertoont deze dit effect in het algemeen in een groot golflengtegebied. Legt men echter een magnetisch veld aan, dan trekt onder bepaalde voorwaarden dit golflengtegebied zich samen tot een klein gedeelte van het spectrum. Door het magneetveld te veranderen, kan men de ontvanger, net als een radiotoestel, op een bepaalde golflengte afstemmen. Dit apparaat [2], dat uit het oogpunt van signaaloverbrenging door lichtgolven wellicht ook technisch van belang kan zijn, berust eveneens op een stukje fundamentele natuurkunde. In het magneetveld trekken namelijk de toegestane energieniveaus der geleidingselektronen zich — op een gecompliceerde en slechts quantummechanisch te beschrijven wijze — samen tot smalle bundels, de zg. Landau-niveaus.

In het volgende zullen wij trachten een overzicht te geven van enkele transportverschijnselen in halfgeleiders (of meer algemeen: in de vaste stof). Om een zekere mate van eenheid te bereiken, zullen wij slechts die effecten bespreken waarbij elastische spanningen in de vaste stof (d.w.z. mechanische trek-, druk- of schuifspanningen) een grote rol spelen. Zelfs met deze beperking moeten vele uiterst belangwekkende en waardevolle resultaten onvermeld blijven. Daarbij zullen wij, ter wille van een aanschouwelijke kwalitatieve voorstelling, goeddeels afzien van wiskundige afleidingen en van de vermelding van alle details. Voor een dieper gaande behandeling van de diverse onderwerpen verwijzen wij naar de aangehaalde literatuur.

De invloed van een statische elastische spanning

De elektrische weerstand van vele halfgeleiders kan aanzienlijk veranderen [3] wanneer in een bepaalde richting een druk- of trekkracht op het materiaal wordt uitgeoefend. Zo neemt b.v. in N-geleidend silicium de relatieve verandering waarden aan tot 1% per 100 kg/cm^2; dit is ongeveer honderd maal zo groot als bij metalen. Om dit effect te kunnen verklaren, moeten we uitgaan van het feit dat de zg. effectieve massa van een geleidingselektron — dit is de verhouding tussen de door een uitwendig veld uitgeoefende kracht en de daardoor teweeggebrachte versnelling — ten gevolge van de wisselwerking met het kristalrooster aanzienlijk kan afwijken van de massa m_0 van een vrij elektron. In silicium bestaan er zelfs verscheidene „categorieën" van geleidingselektronen, die zich in de zg. nevenminima of „valleien" bevinden. Legt men b.v. een elektrisch veld aan parallel met een kubische kristalas, dan blijkt twee derde der elektronen een massa van 0,2 m_0 te bezitten, en één derde de massa 0,9 m_0. Door een druk in de richting van deze as op het kristal uit te oefenen, verschuiven de diverse niveaus zodanig dat de elektronen overgaan naar toestanden waarvoor de hoge massa geldt. Hierdoor vermindert hun versnelling, zodat de elektrische weerstand toeneemt. De technische toepassing van deze effecten vindt men voornamelijk op het gebied van de rekstrookjes, waarbij overigens het gebruik van broze halfgeleiderplaatjes in plaats van ductiele metaaldraden wel enige moeilijkheden van technologische aard oplevert. De op overeenkomstige effecten berustende drukafhankelijkheid van de stroom-spanningkarakteristiek van halfgeleiderdiodes maakt het mogelijk uiterst gevoelige miniatuurmicrofoons [4] te vervaardigen.

Het hier beschreven piëzo-weerstandseffect kan ook met vrucht gebruikt worden voor fundamenteel onderzoek: men kan er waardevolle gegevens mee verkrijgen over de structuur van de energietoestanden der ladingdragers (bandenstructuur) en vooral over de anisotropie. Ook de effecten die een afremming van de door het uitwendige veld versnelde ladingdragers bewerkstelligen (verstrooiingsprocessen, gekenmerkt door relaxatietijden), en die aldus mede bepalend zijn voor de elektrische weerstand, beïnvloeden het piëzo-weerstandseffect. Zo kon door metingen omtrent dit effect [5] experimenteel een duidelijke keuze gemaakt worden uit twee verschillende theoretische modellen van het mechanisme van de elektronenovergang tussen twee valleien onder invloed van roostertrillingen (lattice intervalley scattering).

Vervangt men het stationaire elektrische veld door een wisselveld van zeer hoge frequentie, dan kan men de invloed van verstrooiing verwaarlozen wanneer het elektron tussen twee botsingen vele oscillaties uitvoert. Wat men dan moet meten, is niet het geleidingsvermogen doch de susceptibiliteit. Daar de looptijd van de ladingdragers tussen twee botsingen van de orde van grootte van 10^{-13} s is, leidt de bovenvermelde voorwaarde tot optische frequenties en daarmee tot een onderzoek van de invloed van elastische spanningen op de brekingsindex. Deze zg. foto-elastische effecten kan men niet alleen op rekening schrijven van de gebonden elektronen (10^{23} cm^{-3}), maar er is ook een bijdrage van

[1] J. F. Gibbons en H. S. Horn, Digest of tech. papers, Intern. Solid State Circuits Conf., Univ. of Pennsylvania, Philadelphia 1963.
[2] M. A. C. S. Brown en M. F. Kimmitt, Brit. Comm. and Electronics **10**, 608, 1963.
[3] R. W. Keyes, Solid State Physics **11**, 149, 1960.
[4] W. Rindner, J. appl. Phys. **33**, 2479, 1962.
[5] J. E. Aubrey, W. Gubler, T. Henningsen en S. H. Koenig, Phys. Rev. **130**, 1667, 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de geleidingselektronen [6]; deze hebben nl. in het desbetreffende frequentiegebied een 10^4 maal zo grote polariseerbaarheid. Deze experimenten geven vooral inlichtingen omtrent de samenhang tussen de elastische spanning en de verschuiving van de valleien (deformatiepotentialen) [6].

In een magneetveld beschrijven de ladingdragers in het eenvoudigste geval schroefvormige banen met de veldrichting als as. Hierbij wordt hun hoeksnelheid uitsluitend bepaald door de veldsterkte en de massa van het deeltje. De projectie van deze beweging op een loodrecht op het magneetveld staand vlak toont een harmonisch verloop als van een slinger; de frequentie ervan noemt men de cyclotronfrequentie. Deze beweging kan dus door een elektrisch wisselveld in resonantie gebracht worden, wanneer de frequentie daarvan weinig verschilt van de cyclotronfrequentie. In geval van resonantie wordt een zo groot mogelijke veldenergie aan het elektronensysteem afgegeven. Laat men dus, bij constant gehouden frequentie, het magneetveld van nul af toenemen, dan vindt men een "absorptielijn" waarvan de plaats direct afhangt van de massa van het deeltje. (Voorwaarde is dat de door verstrooiingsverschijnselen veroorzaakte storing voldoende zwak is.)

Deze cyclotronresonantie-techniek is op dit ogenblik de nauwkeurigste en fijnst uitgewerkte methode ter bepaling van de effectieve massa van ladingdragers [7], doch hij blijft beperkt tot zeer zuivere kristallen en zeer lage temperaturen wegens de vereiste grote vrije weglengte. Zo heeft men bij voorbeeld wel de massa van de geleidingselektronen in germanium en silicium, alsmede de anisotropie ervan, op enkele procenten nauwkeurig kunnen bepalen. De massa van de gaten in de valentieband daarentegen heeft men in deze stoffen slechts bij benadering kunnen vaststellen. Hoewel de omstandigheden zodanig gekozen waren dat de botsingsverbreding nagenoeg geen rol zou kunnen spelen, waren de lijnen, vooral bij silicium, zwak en bovendien sterk verbreed. Natuurkundig gezien dient dit toegeschreven te worden aan het feit dat de valentieband bestaat uit dicht bijeen gelegen subbanden, die elkaar wederzijds zodanig beïnvloeden dat afzonderlijke gaten in dezelfde band met verschillende resonantiefrequenties overeenkomen. Hensel en Feher [8] vonden een uitweg uit dit dilemma door de cyclotronresonantie te meten aan silicium dat blootgesteld was aan een elastische spanning. Hierdoor werden de banden die dicht bij elkaar liggen, zover uiteengebracht dat hun wederzijdse beïnvloeding verwaarloosd kon worden. Het resultaat was dat één scherpe resonantielijn verkregen werd, evenals bij de elektronen. Het parallel daarmee uitgevoerde theoretische onderzoek [9] maakte het mogelijk het gehele lijnprofiel te correleren met de elastische spanning door de deformatiepotentialen en de koppelingsparameters tussen de banden in aanmerking te nemen.

De warmtegeleiding in een kristal komt tot stand doordat, microscopisch gezien, van een plaats van hoge temperatuur meer thermische roostertrillingen lopen naar een plaats van lage temperatuur dan in omgekeerde richting. De hiermee gepaard gaande energiestroom komt geheel overeen met de waargenomen warmtestroom. Het warmtegeleidingsvermogen geeft aan in welke mate de roostergolven door kristalfouten verstrooid worden. Bij een bepaald onderzoek werd germanium van roosterfouten voorzien door ongeveer 2×10^{16} cm^{-3} atomen antimoon of arseen toe te voegen; deze hebben het karakter van een donor [10]. Het warmtegeleidingsvermogen bij 2,5 °K bleek door het doteren met arseen gereduceerd te zijn tot ongeveer de helft, door het doteren met antimoon zelfs tot ongeveer een zesde. De theorie volgens welke de verstrooiing der roostertrillingen toegeschreven moet worden aan elektronen die in de laagste energietoestand van de vreemde atomen gebonden zijn, kon dit verschil wel verklaren: de verstrooiingskans, die van het energieverschil tussen singulet- en tripletniveaus afhangt (chemical shift), zou voor antimoon groter zijn. Een doorslaggevend bewijs voor het verstrooiingsmodel werd echter eerst geleverd door het aanleggen van een statische elastische spanning: uit hoofde van de structuur van de grondtoestand van de donorcentra zou het warmtegeleidingsvermogen van met antimoon gedoteerd materiaal in hoge mate van de elastische spanning moeten afhangen, althans wanneer deze wordt aangebracht langs de lichaamsdiagonaal van de eenheidscel van het kristalrooster. Voor arseen zouden deze effecten ongeveer een orde van grootte geringer zijn, hetgeen ook zou gelden voor antimoon voor wat betreft spanningen parallel met de ribbe van de eenheidscel. Inderdaad blijkt in het eerste geval na aanbrengen van een trekspanning van 100 kg/cm^2 het warmtegeleidingsvermogen met een factor 3 toe te nemen, terwijl in alle andere gevallen slechts variaties van ongeveer 10% gemeten werden. Werd de concentratie verhoogd tot 10^{17} cm^{-3} antimoonatomen, dan bleek dit piëzo-thermische effect te verdwijnen. Dit bevestigt de stelling dat de verstrooiing plaatsvindt aan gelokaliseerde elektronen, daar men uit andere onderzoekingen geleerd heeft dat bij deze concentratie de afzonderlijke laagste donorniveaus samenvloeien tot één enkele energieband (een zg. impurity band).

De voortplanting van geluid

Een eenvoudig voorbeeld van het aanleggen van een dynamische elastische spanning is het opwekken van een longitudinale geluidsgolf; hierbij verplaatst een reeks van verdichtingen en verdunningen zich met de geluidssnelheid door het kristal. Als gevolg van de hier-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

boven besproken beïnvloeding van de elektronenenergie door de mechanische spanning „ziet" een geleidingselektron een ruimtelijk verloop van zijn potentiële energie dat eveneens een golfstructuur heeft en zich met de geluidssnelheid voortbeweegt; men stelle zich in dit verband een wasbord voor. Daar de elektronen er naar streven de plaatsen te bereiken of te behouden waar de energie het kleinst is — de dalen van het wasbord —, wordt een deel ervan door de geluidsgolf meegesleept (wave-particle drag). Er treedt dus een akoestoelektrische stroom op. De „ideale" elektronenverdeling wordt evenwel voortdurend verstoord door botsingen die de driftsnelheid der elektronen verminderen. De geluidsgolf wordt hierdoor gedempt. Hierbij dienen wij voorop te stellen dat de vrije weglengte der elektronen klein is ten opzichte van de golflengte van de geluidstrilling, zodat zich in principe binnen elk golfdal een thermische verdeling kan instellen. Wordt nu in de voortplantingsrichting een stationair elektrisch veld aangelegd dat de elektronen voortstuwt met een driftsnelheid die even groot is als de geluidssnelheid, dan verdwijnt het dempingseffect. De elektronen kunnen dan, dank zij de energietoevoer door het elektrische veld, in de golfdalen meelopen zonder dat daarvoor energie aan de geluidsgolf onttrokken behoeft te worden. Maakt men het elektrische veld nog sterker, zodat de driftsnelheid de geluidssnelheid overtreft, dan neemt men een uiterst belangwekkend effect waar: het elektrische veld staat thans energie af aan het akoestische veld, d.w.z. de geluidsamplitude wordt vergroot. Volgens dit beginsel zijn door Hutson, McFee en White [11] in cadmiumsulfide bij een frequentie van 45 MHz geluidsversterkingen tot 54 dB/cm bereikt. Een reeks van effecten bij bismut (b.v. het anomale gedrag van de weerstand bij aanleggen van een magneetveld [12]) zijn waarschijnlijk eveneens op een sterke akoestoelektrische wisselwerking terug te voeren.

Onder de halfgeleiders blijkt het kortelings grondig onderzochte loodtelluride, wegens de grote beweeglijkheid van zijn ladingdragers, wel bijzonder geschikt voor onderzoekingen op dit gebied.

De reeds vermelde methode der cyclotronresonantie kan men bij metalen slechts op een beperkte schaal toepassen. Het vereiste hoogfrequente veld dringt ten gevolge van het skineffect slechts ongeveer 10^{-5} cm in het kristal door, en resonantieverschijnselen zijn slechts waarneembaar in een parallel met het kristaloppervlak georiënteerd magnetisch veld (Azbel-Kaner-effect [7]). Daar anderzijds een door het kristal lopende geluidsgolf vergezeld gaat van een wisselveld, kan dit laatste gebruikt worden voor het opwekken van cyclotronresonantie. Men spreekt dan van magneto-akoestische resonantie. De gemakkelijkst waarneembare variant van deze verschijnselen is de zg. „ruimtelijke cyclotronresonantie", welke optreedt wanneer de middellijn van de elektronenbaan ongeveer gelijk is aan de golflengte van het geluid.

Roostertrillingen

Indien door een kristalrooster een golftrein loopt van zodanig hoge frequentie dat de golflengte klein is ten opzichte van de vrije weglengte der elektronen, dan is thermische relaxatie niet mogelijk. De energie van elk afzonderlijk elektron wordt b.v. in het verdichtingsgebied een weinig verhoogd en in het verdunningsgebied een weinig verlaagd, en het is waarschijnlijk dat na het passeren van een golftrein van eindige lengte de energie van het elektron dezelfde is als voordien.

Deze voorstelling, volgens welke de elektronenenergie de variaties in de roosterconstante adiabatisch volgt, is echter slechts onder bepaalde voorwaarden juist. Het kan nl. voorkomen dat er energie-uitwisseling plaatsvindt tussen het elektron en de roostertrilling en dat het elektron daarbij een andere quantumtoestand aanneemt. Deze toestandsveranderingen zijn de voor de elektrische weerstand verantwoordelijke verstrooiingsverschijnselen; in dit geval spreekt men van verstrooiing door het rooster. Volgens de quantum-mechanische interpretatie kan deze uitwisseling van energie niet continu plaatsvinden, doch slechts in quanta ter grootte $h\nu$, waarin h de constante van Planck is en ν de frequentie van de roostertrillingen. Het blijkt vaak voordelig te zijn de roostertrillingen niet te definiëren uitgaande van de onderlinge positie van de atomen in het kristal, doch door de zojuist genoemde energiequanta die, als kwasi-deeltjes, worden aangeduid met de naam „fononen". Men zegt dat een elektron „een fonon uitzendt" indien het een gedeelte van zijn energie aan een roostertrilling afstaat en daarmee de amplitude hiervan verhoogt. In het omgekeerde geval absorbeert het een fonon.

De studie van de fononen, van hun onderlinge wisselwerking en van die met ladingdragers, vormt een van de pijlers waarop de fysica der transportverschijnselen in halfgeleiders rust, en is derhalve een van de grondigst bestudeerde onderdelen hiervan. Wij willen slechts twee resultaten ervan vermelden. Met behulp van verstrooiingsproeven met neutronen gelukte het Brock-

[6] K. J. Schmidt-Tiedemann, Phys. Rev. Letters **7**, 372, 1961; B. G. Weigel, Philips: Unsere Forschung in Deutschland, blz. 37, Philips ZL GmbH, Aachen-Hamburg 1964.
[7] B. Lax en J. G. Mavroides, Solid State Physics **11**, 261, 1960.
[8] J. C. Hensel en G. Feher, Phys. Rev. **129**, 1041, 1963.
[9] H. Hasegawa, Phys. Rev. **129**, 1029, 1963.
[10] R. J. Sladek, Rep. Internat. Conf. on the physics of semiconductors, Exeter 1962, blz. 35.
[11] A. R. Hutson, J. H. McFee en D. L. White, Phys. Rev. Letters **7**, 237, 1961.
[12] L. Esaki, Phys. Rev. Letters **8**, 4, 1962.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

house en zijn medewerkers voor de belangrijkste halfgeleiders, germanium en silicium [13], het fononenspectrum te bepalen, d.w.z. het verband tussen de energie van bepaalde fononen en de golflengte van de hiermee corresponderende roostertrilling (deze methode is niet alleen beperkt tot halfgeleiders [14]). Het door Shockley en anderen [15] gesignaleerde feit dat de stroom in een germaniumkristal bij oplopende spanning verzadigd raakt, zowel als de sterke anisotropie van het geleidingsvermogen in een sterk elektrisch veld [16], kon men met behulp van drie verschillende typen van fonon-elektronwisselwerking kwantitatief interpreteren. De energie-uitwisseling tussen deze „hete" elektronen [17] en het kristalrooster voltrekt zich hoofdzakelijk door emissie van zg. optische fononen, dat zijn fononen waarvan de energie bij dezelfde golflengte van de roostertrilling enige honderden malen zo groot is als die van de vergelijkbare „akoestische" fononen; laatstgenoemde fononen komen overeen met de gebruikelijke geluidsgolven. De theoretische analyse van de bovengenoemde experimenten leverde numerieke waarden op voor de op andere wijze moeilijk vast te stellen koppelingsconstante tussen elektronen en optische fononen.

Polaronen

Het model van een in wezen vrij geleidingselektron dat slechts nu en dan eens door een fonon verstrooid wordt, gaat in halfgeleiders met sterke elektron-fononwisselwerking niet op. Hier emitteert en absorbeert het elektron voortdurend fononen, die het op zijn weg door het kristal als een wolk omhullen („aangekleed deeltje"). Het nieuwe kwasi-deeltje (elektron plus fononenwolk) noemt men „polaron". Kan men het geval van zwakke elektron-fononwisselwerking met behulp van de quantummechanische storingstheorie vrijwel herleiden tot een probleem van een enkel deeltje, het polaron werpt een typisch meerdeeltjesprobleem op, dat slechts opgelost kan worden met methodes van de veldentheorie [18]. Klassiek geredeneerd moet men zich voorstellen dat het elektron door zijn elektrisch veld in zijn naaste omgeving in het kristal een elastische spanning teweegbrengt. Het samenstel van het elektron en de spanningstoestand in het kristal die het oproept, welk samenstel zich bij elk ladingstransport slechts in zijn geheel kan bewegen, vormt het polaron. De onderzoekingen aangaande dit transportmechanisme, dat vermoedelijk in de zilverhalogeniden optreedt [19], verkeren nu nog in een te vroeg stadium om een korte samenvatting van de resultaten mogelijk te maken.

Met het uiterste tegengestelde van het „vrije" geleidingselektron heeft men te maken wanneer het elektron vrijwel permanent in een bepaalde roosterpositie gelokaliseerd blijft. Door het botsen van een fonon (of soms van meer dan één) kan een zwak gebonden elektron voldoende energie verkrijgen om naar de volgende roosterplaats over te springen. Deze vorm van elektrische geleiding, die wel het „hopping"-mechanisme genoemd wordt, treedt b.v. op in de oxiden van de overgangsmetalen, wanneer deze op geschikte wijze gedoteerd zijn met vreemde atomen van afwijkende valentie. Bij zeer lage temperaturen voegen de beweeglijke ladingdragers zich bij de vreemde atomen en vormen zodoende draaibare mechanische dipolen, want ook hier wordt de ladingdrager vergezeld door een elastisch gespannen zone. In het veld van een geluidsgolf trachten deze dipolen zich te richten, met als gevolg dat er een zekere demping optreedt; deze vertoont een duidelijk aanwijsbaar maximum wanneer de frequentie van de geluidsgolf overeenkomt met de overspringfrequentie. Aan de hand van zulke dempingsmetingen aan met lithium gedoteerd nikkeloxide zijn door Van Houten [20] de activeringsenergie en de frequentieconstante van deze processen bepaald.

Supergeleiding

Een van de merkwaardigste transportverschijnselen is de supergeleiding. Dit is, zoals bekend, het vermogen van vele metalen om beneden een bepaalde „sprongtemperatuur" bijzonder sterk geleidend te worden en in feite generlei weerstand te bieden aan de doorgang van elektrische stroom. Hoewel, natuurkundig bezien, het gelijktijdig optredende absolute diamagnetisme (het verdringen van de magnetische veldlijnen tot buiten het volume van de geleider) misschien van groter fundamenteel belang moge zijn, uit een oogpunt van technische toepassing is het belangrijkst de door het verdwijnen van alle weerstand geschapen mogelijkheid om persisterende stromen op te wekken. Een door inductie in een supergeleidende ring opgewekte stroom blijft, zonder dat enige spanningsbron nodig is, gedurende onbepaald lange tijd rondlopen. Geen der tot nu toe verrichte metingen [21] gaf enige aanwijzing dat zo'n stroom met de tijd zou afnemen. Daar de weerstand waarschijnlijk exact gelijk nul is, vormen deze materialen ideale hulpmiddelen voor het transport van elektrische energie, voor het bouwen van elektromagneten, enz. Wel maken de lage sprongtemperaturen der thans bekende (ongeveer 450) supergeleiders [22] dat praktische toepassing van supergeleiders slechts in een zeer beperkte mate mogelijk is; de hoogste tot nu toe gemeten sprongtemperatuur bezit niobium-tin met 18 °K ofwel ca. —255 °C. Van het verschijnsel der supergeleiding, dat in 1911 door Kamerlingh Onnes [23] is ontdekt, is, voortbouwende op een reeks van gedeeltelijke oplossingen, pas een bevredigende verklaring gegeven door Bardeen, Cooper en Schrieffer in 1957 [24]. Deze verklaring voert ons, nadat ze aanvankelijk een andere richting schijnt in te slaan, terug in het kader

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de elastische spanningen in het kristalrooster. Supergeleiding is namelijk het gevolg van een aantrekkingskracht tussen de elektronen, welke de normale coulombafstoting (van ladingen van hetzelfde teken) in dit geval overtreft. Deze aantrekkingskracht wordt veroorzaakt doordat de elektronen onderling fononen uitwisselen. Het vermoeden dat er een verband bestaat tussen roostertrillingen en het totstandkomen van supergeleiding werd reeds door Fröhlich [25] geuit, en ook het experimenteel waargenomen verband tussen de sprongtemperatuur en de atoommassa [26] (isotopeneffect) wees in die richting. De eenvoudige voorstelling als zou het ene elektron een fonon emitteren dat daarna door een ander elektron weer geabsorbeerd wordt, dient echter in tweeërlei opzicht gewijzigd te worden. Ten eerste is de onderlinge kracht slechts aantrekkend wanneer de tussen de elektronen uitgewisselde energie kleiner is dan de energie van het fonon dat deze uitwisseling bewerkstelligt. Volgens de klassieke voorstelling kan dus een dergelijk fonon, op grond van de wet van het behoud van arbeidsvermogen, in het geheel niet geëmitteerd worden. Volgens de quantummechanica echter behoeft bij een uit twee stappen bestaande overgang aan de wet van het behoud van arbeidsvermogen slechts voldaan te worden voor het proces als geheel, doch niet noodzakelijk door een der beide stappen afzonderlijk, mits deze snel genoeg op elkaar volgen (preciezer gezegd: onderling coherent zijn). Men spreekt derhalve van de uitwisseling van een „virtueel" fonon. In de tweede plaats dient men deze uitwisseling te behandelen volgens een rekenwijze waarbij de twee elektronen voor en na de uitwisseling beschouwd worden als twee verschillende paren. Pas na deze uitbreiding van het principe van Fröhlich gelukte het Bardeen en zijn medewerkers de theorie met de ervaring in overeenstemming te brengen.

Het verschijnsel der supergeleiding is ook uit anderen hoofde een fascinerend onderwerp voor de natuurkundige. Gewoontegetrouw verwacht men van een macroscopisch lichaam dat dit zich volgens de wetten der klassieke natuurkunde zal gedragen: door het grote aantal atomen neemt men slechts het gemiddelde van de quantummechanische eigenschappen waar. Een supergeleidende ring echter vertegenwoordigt een quantumtoestand van macroscopische afmetingen en is daarmede, afgezien van het superfluïde helium, het enige bekende systeem met die eigenschap. Een direct experimenteel bewijs hiervoor werd kortelings geleverd door Deaver en Fairbank [27], en onafhankelijk van hen door Doll en Näbauer [28], door het meten van de quantumsprongen van de magnetische flux in een supergeleidende ring. De grootte van het fluxquantum toonde aan dat de ladingdragers als elektronenparen opgevat moeten worden en niet als afzonderlijke elektronen [29]. Een stelsel van supergeleidende ringen met ingevroren magnetische flux kan dienen als digitaal geheugen [30], waarbij, in tegenstelling met andere op supergeleiding berustende systemen, de informatie door tijdelijk uitschakelen van de stroom niet vernietigd wordt (cold memory).

[13] B. N. Brockhouse en P. K. Iyengar, Phys. Rev. **111**, 747, 1958 en B. N. Brockhouse, Phys. Rev. Letters **2**, 256, 1959.
[14] A. D. B. Woods, B. N. Brockhouse, R. A. Cowley en W. Cochran, Phys. Rev. **131**, 1025, 1963.
[15] E. J. Ryder en W. Shockley, Phys. Rev. **81**, 139, 1951.
[16] W. Sasaki, M. Shibuya en K. Mizuguchi, J. Phys. Soc. Japan **13**, 456, 1958.
[17] H. G. Reik, Festkörperprobleme **1**, 89, 1962, alsmede K. J. Schmidt-Tiedemann, Festkörperprobleme **1**, 122, 1962.
[18] R. P. Feynman, R. W. Hellwarth, C. K. Iddings en P. M. Platzman, Phys. Rev. **127**, 1004, 1962.
[19] F. Garcia-Moliner, Phys. Rev. **130**, 2290, 1963.
[20] S. van Houten, Rep. Internat. Conf. on the physics of semiconductors, Exeter 1962, blz. 197.
[21] B. Serin, Hdb. d. Physik, Bd. 15, blz. 210, Springer, Berlijn 1956.
[22] American Institute of Physics Handbook, 2nd ed., **9**-112 e.v., McGraw-Hill, New York 1963.
[23] H. Kamerlingh Onnes, Comm. Phys. Lab. Leiden, no. 119, 120, 122, 1911.
[24] J. Bardeen, L. N. Cooper en J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **108**, 1175, 1957.
[25] H. Fröhlich, Phys. Rev. **79**, 845, 1950.
[26] E. Maxwell, Phys. Rev. **78**, 477, 1950, alsmede C. A. Reynolds, B. Serin, W. H. Wright en L. B. Nesbitt, Phys. Rev. **78**, 487, 1950.
[27] B. S. Deaver, Jr., en W. M. Fairbank, Phys. Rev. Letters **7**, 43, 1961.
[28] R. Doll en M. Näbauer, Phys. Rev. Letters **7**, 51, 1961.
[29] N. Byers en C. N. Yang, Phys. Rev. Letters **7**, 46, 1961, alsmede L. Onsager, Phys. Rev. Letters **7**, 50, 1961.
[30] D. J. Dumin en J. F. Gibbons, J. appl. Phys. **34**, 1566, 1963.

Samenvatting. De schrijver geeft een overzicht van de transportverschijnselen in halfgeleiders (elektrisch en warmtegeleidingsvermogen), waarbij elastische spanningen in een vast lichaam (mechanische trek-, druk- of schuifspanningen) een essentiële rol spelen. Met name berusten het piëzoweerstandseffect, fotoelastische verschijnselen en zekere toepassingen van de cyclotronresonantie op de wisselwerking tussen geleidingselektronen en het kristalrooster; de warmtegeleiding berust op verstrooiing van de roostergolven als gevolg van roosterfouten. Ook worden akoesto-elektrische wisselwerkingen en magneto-akoestische resonantie behandeld. De begrippen fonon en polaron worden verklaard. Ten slotte wordt ook de supergeleiding in de beschouwingen opgenomen, daar dit verschijnsel kan worden geïnterpreteerd als een uitwisseling van fononen tussen elektronenparen van de supergeleider en derhalve ook past in het kader van elastische spanningen van het kristalrooster.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Warmte-isolatie van natriumlampen

R. Groth en E. Kauer

536.21:621.327.532

Inleiding

Ondanks de grote vooruitgang die de lichttechniek in de laatste tientallen jaren gemaakt heeft, wordt bij alle gebruikelijke lichtbronnen nog steeds het grootste deel van de toegevoerde energie afgegeven in de vorm van warmte. Het visuele rendement is tamelijk klein: het bedraagt voor een gloeilamp ongeveer 2% en voor natriumlampen, die van alle lichtbronnen het hoogste rendement bezitten, ongeveer 15%. Talrijke pogingen zijn reeds ondernomen om de ongewenste warmtestraling door bepaalde maatregelen te verminderen. Een van deze maatregelen, namelijk het gebruik van selectief reflecterende lagen op een natriumlamp, zal in het volgende behandeld worden.

De gedachte, de spectrale verdeling van de door een lichtbron uitgezonden straling door middel van geschikte reflexiefilters te beïnvloeden, is geenszins nieuw; men komt deze reeds tegen in verscheidene oude octrooien. In deze octrooien wordt meestal voorgesteld de glazen buis die de lichtbron omgeeft, te bedekken met een dun laagje metaal, bij voorkeur goud of koper. Dit laagje moet de eigenschap bezitten de ongewenste infrarode straling weer naar het gloeilichaam terug te kaatsen doch het zichtbare licht vrijwel onverzwakt door te laten. Het vermogen dat men dan, bij eenzelfde temperatuur van het gloeilichaam, aan de lichtbron moet toevoeren, is geringer en het rendement dus hoger. Onder het rendement van een lichtbron verstaan we, zoals algemeen gebruikelijk, de verhouding tussen de totale lichtstroom (in lumen) en het toegevoerde elektrische vermogen (in watt).

Op het eerste gezicht ligt het niet zo voor de hand dat het aanbrengen van een infraroodreflecterend filter op de glazen mantel van een natriumlamp tot verbetering van het rendement leidt: ten slotte is een natriumlamp geen thermische straler in de strikte betekenis van het woord, doch een lagedruk-gasontladingslamp. Voor een juist begrip van het effect van zulke filters dienen we daarom iets dieper in te gaan op de natuurkundige grondslagen van de natriumlamp en op de energiebalans ervan.

De energiebalans van de natriumlamp

Een 140-W-natriumlamp bestaat uit een mantel en een U-vormige ontladingsbuis die zich daarbinnen bevindt. De buitendiameter van deze buis is 17 mm en de totale lengte 850 mm (*fig. 1*). De ontladingsbuis bevat neon waaraan een weinig argon is toegevoegd — totale druk van ongeveer 10 torr —, en voorts een bepaalde hoeveelheid vrij natrium; als de lamp koud is, bevindt dit natrium zich in de vaste faze. Onmiddellijk na het ontsteken straalt een lamp dientengevolge hoofdzakelijk het „rode" spectrum van neon uit; aanvankelijk neemt dit gas vrijwel alléén deel aan de ontlading. Wordt de ontladingsbuis warmer, dan begint het natrium te verdampen en er stelt zich een, bij de heersende temperatuur behorende, partiële evenwichtsdruk in. De lamp straalt het meeste licht uit bij een partiële natriumdruk van enige duizendsten torr; dit komt overeen met een temperatuur van ongeveer 270 °C van de ontladingsbuis (op de koudste plaats). Verhoogt men de temperatuur van de ontladingsbuis verder, door een groter vermogen toe te voeren, dan neemt de lichtstroom weer af, doordat er, als gevolg van de hoge partiële natriumdruk, zelfabsorptie optreedt. Voor elke constructie van de natriumlamp bestaat er dus een optimale temperatuur voor de ontladingsbuis.

Fig. 1. Schematische voorstelling van een moderne natriumlamp. De donkere vlekken in de ontladingsbuis stellen vrij natrium voor dat in koude toestand in deze uitstulpingen gecondenseerd is. De stippellijn aan de binnenzijde van de mantel is het reflexiefilter, dat de infrarode straling naar de ontladingsbuis terugkaatst.

In thermisch evenwicht moet aan de wand van de ontladingsbuis van binnen uit evenveel vermogen worden toegevoerd als deze naar buiten toe door straling,

Dr. R. Groth en dr. E. Kauer (adjunct-directeur) zijn medewerkers van het laboratorium Aken van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

geleiding en convectie verliest. Bij moderne typen van natriumlampen is de ruimte tussen mantel en ontladingsbuis geëvacueerd, waardoor er geen convectieverliezen meer kunnen optreden en de verliezen door geleiding sterk verminderd zijn. Niet gereduceerd is het verlies door de warmtestraling van de zich op een temperatuur van 270 °C bevindende ontladingsbuis; deze gedraagt zich als een vrijwel zwarte straler en emitteert bij een 140-W-natriumlamp ongeveer 100 W.

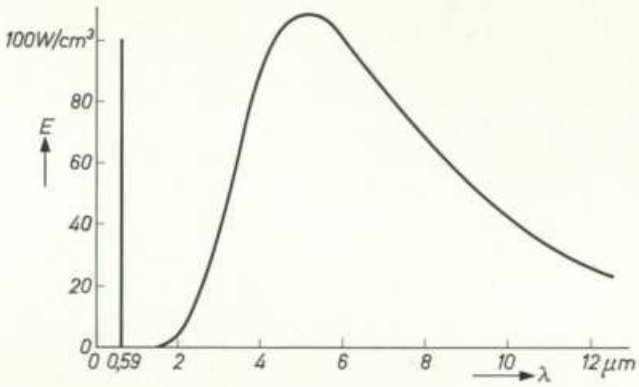


Fig. 2. Spectrale verdeling $E(\lambda)$ van de door een zwart lichaam van 540 °K uitgestraalde energie in een omgeving van 300 °K. De ontladingsbuis van een natriumlamp emitteert bij benadering ditzelfde spectrum. De positie van de natriumlijnen is door een lijn bij 0,59 μm aangegeven, doch breedte en hoogte hiervan zijn geen maat voor de intensiteit der lijnen.

Fig. 2 toont de energieverdeling van de straling van de ontladingsbuis ($T = 540$ °K) bij een omgevingstemperatuur $T_o = 300$ °K; het *continue* spectrum is uitsluitend afkomstig van het oppervlak van de ontladingsbuis. Het maximum ligt in het infrarood bij ongeveer 5,5 μm.

Voor het beperken van de verliezen door infrarode straling staan ons de volgende mogelijkheden ten dienste:

1) De ontladingsbuis wordt omgeven met een of meer schutbuizen die natriumlicht doorlaten. Dit principe is beschreven door Van de Weijer [1].

2) De ontladingsbuis wordt omgeven met een filter dat natriumlicht doorlaat doch warmtestraling reflecteert. Zulk een filter zou ideaal zijn wanneer dit het natriumlicht vrijwel onverzwakt doorliet en de infrarode straling vanaf ongeveer 4 μm volledig reflecteerde. Een filter met deze eigenschappen zou dus de warmtestraling op de ontladingsbuis terugwerpen zonder zelf noemenswaard in temperatuur te stijgen (warmtereflexiefilter). Zo'n filter kan men het best op de binnenzijde van de buitenballon aanbrengen, maar het is ook denkbaar dat men de ontladingsbuis hiermee bedekt, waardoor dan de infraroodemissie wordt verminderd. Wanneer het reflexievermogen groot genoeg is en de afstand tussen ontladingsbuis en buitenballon voldoende klein, voeren beide oplossingen tot hetzelfde resultaat.

Warmtereflexiefilters voor natriumlampen

Er bestaan helaas geen filters die geheel aan bovengenoemde eisen voldoen. De gewenste goede doorlating van natriumlicht is het eerst gerealiseerd met interferentiefilters van meervoudige diëlektrische lagen, doch deze hebben het nadeel dat zij in het infrarood slechts in een betrekkelijk klein golflengtegebied sterk reflecteren. Bovendien zijn lampen die met deze filters zijn uitgerust, voor normaal gebruik te kostbaar.

Behalve de interferentiefilters kent men evenwel metalen die in de vorm van een enkelvoudig dun laagje de gewenste eigenschappen reeds min of meer benaderen. In het bijzonder geldt dit voor goud en koper. Als voorbeeld daarvan toont *fig. 3* de doorlating en de reflexie van enige dunne goudlaagjes als functie van de golflengte. Men ziet dat de reflexie R reeds in het nabije infrarood b.v. de waarde 90 % bereikt, terwijl de doorlating D voor natriumlicht niet lager daalt dan tot 50 %.

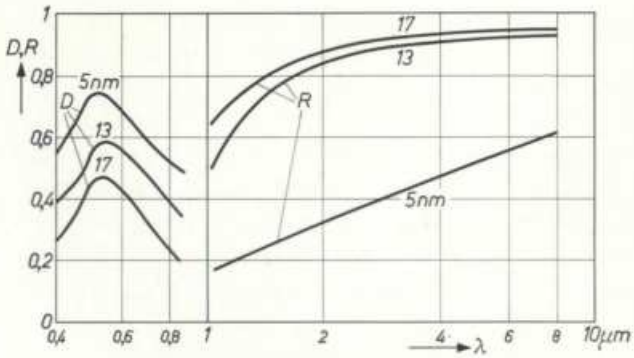


Fig. 3. Doorlating D en reflexie R van goudlaagjes van verschillende dikte als functie van de golflengte λ.

Klaarblijkelijk bestaat er een optimale laagdikte, want dikke lagen laten geen licht meer door, terwijl dunne lagen wel het licht behoorlijk doorlaten, doch slechts weinig infrarood reflecteren. Men kan de rendementsverbetering schatten wanneer de spectrale doorlatings- en reflexiekrommen als functie van de laagdikte bekend zijn. Zulke krommen kan men in principe berekenen uit de optische constanten van het materiaal, namelijk de brekingsindex n en de absorptie-index K [2]. Bij een laagdikte van minder dan 20 nm (200 Å) wijken de waarden van de optische constanten echter meestal af van die welke gelden voor het massieve materiaal. Men moet dus voor een bepaling van het rendement niet uitgaan van de theoretisch berekende krommen, maar van experimentele gegevens. Langs deze weg werd

[1] M. H. A. van de Weijer, Philips techn. T. **23**, 226, 1961.
[2] H. Mayer, Physik dünner Schichten, deel I, Stuttgart 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de optimale laagdikte geschat op ongeveer 15 nm. Metingen aan een serie proeflampen voorzien van een goudlaagje van verschillende dikte hebben deze schatting bevestigd. Hierbij werd bij een laagdikte van 16 nm een verhoging van het rendement geconstateerd van 100 lm/W tot 130 lm/W (deze waarden gelden voor 140-W-natriumlampen). Een nadeel van deze lampen was dat de totale lichtstroom met 30% van de oorspronkelijke waarde verminderd was. Dit moet, bijgelijkblijvende temperatuur, deels worden toegeschreven aan de geringere excitatiedichtheid — een gevolg van de kleinere stroom —, deels echter ook aan de reflexie- en absorptieverliezen van het goudfilter.

Om vast te stellen welk rendement met een ideaal filter en de thans toegepaste ontladingsbuizen maximaal bereikt kan worden, werden de reflexielagen vervangen door stralingsverwarming. De uitwerking hiervan op de ontladingsbuis is volkomen dezelfde als die van een reflexiefilter met variabele reflexiecoëfficiënt. Het voordeel van deze methode is dat alle metingen aan dezelfde ontladingsbuis verricht kunnen worden.

Het resultaat van dit onderzoek vindt men in *fig. 4*. Hierin is het rendement uitgezet als functie van het aan de ontladingsbuis toegevoerde elektrische vermogen. Elke kromme is gemeten bij een bepaalde, constante warmte-isolatie, d.w.z. bij een constante stroom van aanvullende verwarming. Deze neemt toe met het rangnummer van de kromme; kromme *1* geldt voor het geval waarbij aanvullende verwarming geheel ontbrak. Er is niet geprobeerd elke isolatiewaarde te correleren met een reflexiecoëfficiënt, daar de warmtegeleidingsverliezen, die met een reflexiefilter *niet* beïnvloed kunnen worden, niet nauwkeurig bekend zijn. Het hierbij bestreken gebied van warmte-isolaties omvat echter alle praktisch realiseerbare mogelijkheden; kromme *7* b.v. vertegenwoordigt het geval van een 16 nm dikke goudlaag. Het blijkt uit fig. 4 dat het, door voldoend sterk te isoleren, mogelijk moet zijn met natriumlampen een rendement van meer dan 300 lm/W te bereiken. Tevens blijkt echter dat deze rendementsverbetering voor de onderzochte ontladingsbuis onvermijdelijk gepaard gaat met een vermindering van lichtstroom. Zelfs het gebruik van ideale, d.w.z. het natriumlicht volkomen doorlatende, filters kan hierin geen verandering brengen. Wil bij hoog rendement de lichtstroom niet al te zeer dalen, dan zal men dus de condities die de ontlading bepalen, bij de verbeterde warmte-isolatie dienen aan te passen.

Gezien de onvermijdelijke lichtverliezen bij een verbeterde warmte-isolatie, zal men er natuurlijk naar streven verdere verliezen in de filters zo veel mogelijk te beperken. Bij filters van goud of andere metalen gelukt het de reflexieverliezen voor natriumlicht door het aanbrengen van een diëlektrische laag te elimineren

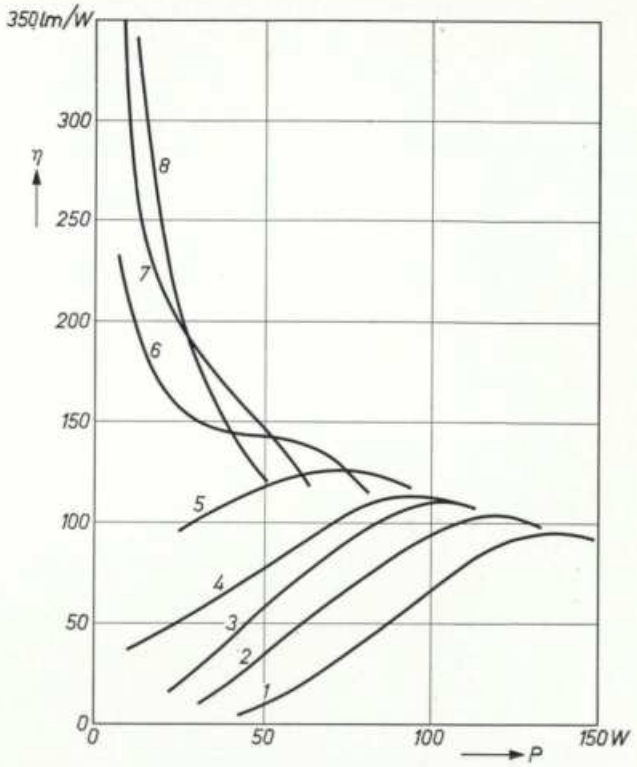


Fig. 4. Het rendement η van de ontladingsbuis van een 140-W-natriumlamp als functie van het in de ontladingsbuis omgezette vermogen P, bij verschillende waarden van de warmte-isolatie. De isolatie neemt toe met het rangnummer van de kromme.

of althans aanzienlijk te verminderen. Deze oplossing komt in hoge mate overeen met het bekende procédé ter vermindering van de reflexieverliezen in optische systemen.

Als voorbeeld hiervan vindt men in *fig. 5* de doorlating en de reflexie van een 13 nm dikke goudlaag met en zonder antireflexielaag — in dit geval een ZnS-laag van ongeveer 32 nm. De aangebrachte antireflexielaag verhoogt de doorlating van natriumlicht van 57% tot 77%, zonder het reflexievermogen in het relevante infraroodgebied te verminderen. Door het gebruik van dergelijke verbeterde goudlagen hoopt men het rendement nog met 30% te kunnen verhogen.

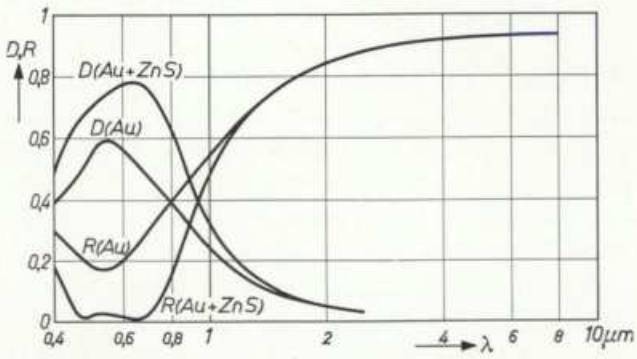


Fig. 5. Spectrale doorlating D en reflexie R van een 13 nm dikke goudlaag vóór (Au) en na het aanbrengen van een diëlektrische antireflexielaag van zinksulfide (Au + ZnS).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Verdere bijzonderheden willen we buiten beschouwing laten, maar wel vermelden we nog dat, ter algehele vermijding van reflexie, de brekingsindex van het materiaal van de antireflexielaag des te hoger moet zijn naarmate de reflexiecoëfficiënt van de onbedekte metaallaag hoger is [2]. Met name komen voor deze toepassing in aanmerking sterk brekende stoffen als ZnS ($n = 2{,}3$), $PbCl_2$ ($n = 2{,}15$), Bi_2O_3 ($n = 1{,}91$), enz.

Overigens hoeft men voor het maken van antireflexielagen niet beslist van goud uit te gaan. Lagen van andere goed geleidende metalen kunnen eveneens bevredigende resultaten opleveren. In *fig. 6* vindt men de grafische voorstelling van de eigenschappen van een zilverlaag mèt en zonder antireflexielaag van zinksulfide. De doorlating van natriumlicht wordt hier door

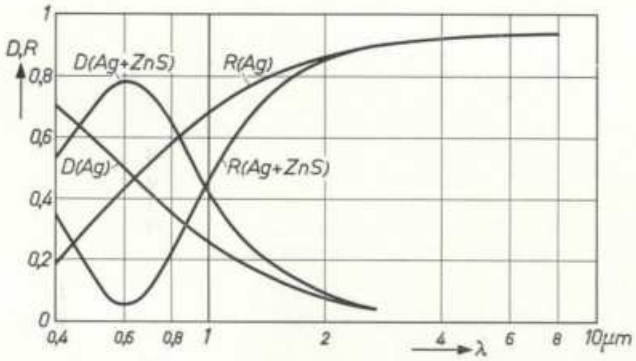


Fig. 6. Spectrale doorlating D en reflexie R van een ca. 10 nm dikke zilverlaag vóór (Ag) en na het aanbrengen van een 0,11 μm dikke diëlektrische antireflexielaag van zinksulfide (Ag + ZnS).

de antireflexielaag verhoogd van 50 % tot 76 %. Evenals bij de goudlaag wordt ook hier de infraroodreflexie niet door de antireflexielaag verminderd.

Hoewel de doorlating van metaallagen met antireflexielagen waarden tot 80 % kan aannemen, blijft het de vraag of men ook filters kan realiseren die in het geheel niet absorberen maar in het infrarood toch een even hoge reflexiecoëfficiënt hebben. Daar de sterke infraroodreflexie der metalen op hun grote geleidingsvermogen berust, d.w.z. op de aanwezigheid van vrije ladingdragers, ligt het voor de hand ook het gebruik van sterk gedoteerde halfgeleiders te overwegen.

Vrije ladingdragers, zoals b.v. elektronen in halfgeleiders, kunnen de optische constanten van een medium op karakteristieke wijze veranderen. Stel dat de diëlektrische constante van het medium bij afwezigheid van vrije ladingdragers ε_g is. We nemen aan dat ε_g in het beschouwde frequentie-interval reëel is, en stellen dus voorop dat in dit interval geen absorptieverschijnselen optreden. Voegen we aan het materiaal nu vrije ladingdragers toe, door het geschikt te doteren, dan gelden volgens de theorie van Drude [3] de volgende dispersiebetrekkingen:

$$n^2 - K^2 = \varepsilon_g - \frac{Ne^2}{m^*\varepsilon_0(\omega^2 + \gamma^2)},$$

$$2nK = \frac{\gamma Ne^2}{m^*\varepsilon_0\omega(\omega^2 + \gamma^2)}.$$

De hierin voorkomende dempingsfactor γ hangt van de gelijkstroombeweeglijkheid μ van de ladingdragers af volgens de betrekking $\gamma = e/\mu m^*$. De grootheid N is de concentratie der vrije ladingdragers, e de lading van het elektron, m^* de effectieve massa van de ladingdragers en ε_0 de diëlektrische constante van het vacuüm.

Wij normeren de beide betrekkingen door het invoeren van een karakteristieke frequentie

$$\omega_p = \left(\frac{Ne^2}{\varepsilon_0\varepsilon_g m^*} - \gamma^2\right)^{\frac{1}{2}},$$

welke bepaald wordt door $n^2 - K^2 = 0$ en die men de plasmafrequentie noemt. Men verkrijgt dan overzichtelijker formules, waarin nog slechts ω/ω_p als onafhankelijk variabele en γ/ω_p als parameter voorkomen:

$$n^2 - K^2 = \varepsilon_g\left[1 - \frac{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega_p}\right)^2}{\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2 + \left(\frac{\gamma}{\omega_p}\right)^2}\right],$$

$$2nK = \varepsilon_g \frac{\frac{\gamma}{\omega_p}\left[1 + \left(\frac{\gamma}{\omega_p}\right)^2\right]}{\frac{\omega}{\omega_p}\left[\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2 + \left(\frac{\gamma}{\omega_p}\right)^2\right]}.$$

Berekent men uit deze vergelijkingen n en K en daaruit wederom, volgens de bekende betrekking $R = [(n-1)^2 + K^2]/[(n+1)^2 + K^2]$, het reflexievermogen, dan verkrijgt men het in *fig. 7* getoonde resultaat. Hieruit blijkt duidelijk dat de flanksteilheid van deze krommen, en daarmee ook de grootte van de infraroodreflexie, in feite afhangt van de verhouding γ/ω_p. Wil men met een filter een bevredigende scheiding verkrijgen, dan dient dit quotiënt zo klein mogelijk te zijn. De plasmafrequentie ω_p bepaalt hoofdzakelijk de grens tussen het doorlaat- en het reflexiegebied van het filter, mits de laagdikte juist gekozen is. Bij natriumlampen dient deze grens tussen 1 en 3 μm te liggen, waardoor de plasmafrequentie ω_p in hoofdzaak vastligt. Om γ/ω_p klein te maken, moet γ dus zelf klein zijn, d.w.z. het filtermateriaal dient het grootst mogelijke produkt van beweeglijkheid en effectieve massa te bezitten.

[3] P. Drude, Phys. Z. **1**, 161, 1900.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

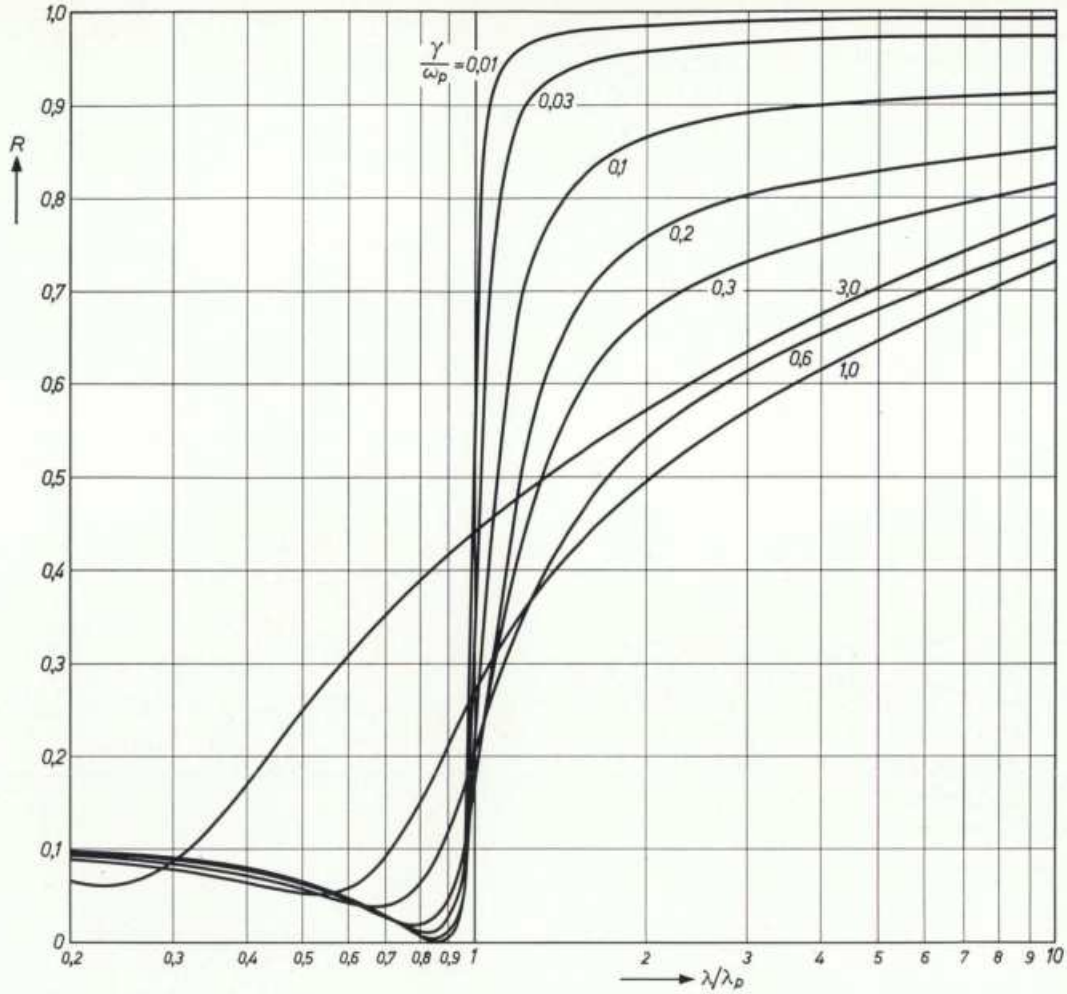


Fig. 7. Genormeerd reflexievermogen voor vrije ladingdragers in een medium met de relatieve diëlektrische constante $\varepsilon_g = 4$. De normering is geschied door invoeren van de plasmagolflengte $\lambda_p = 2\pi c/\omega_p$ (zie de tekst).

In *fig. 8* vindt men de berekende doorlaat- en reflexiekrommen voor een denkbeeldig filter dat de volgende materiaalparameters heeft: $\varepsilon_g = 10$; $N = 1{,}13 \times 10^{22}$ cm^{-3}, $\mu = 100$ cm^2/Vs; $m^* = 0{,}5\ m_0$ (m_0 is de rustmassa van het elektron); $d = 0{,}03$ μm. Men ziet dat bij de juiste laagdikte een doelmatige scheiding

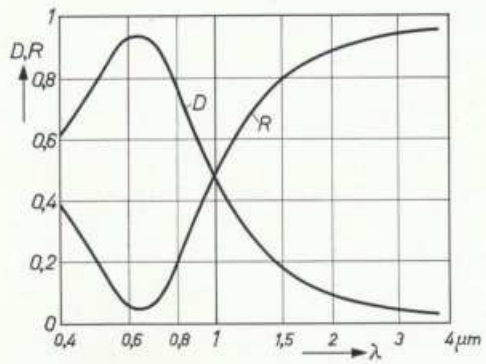


Fig. 8. Spectrale doorlating D en reflexie R van een hypothetisch filter met de materiaalparameters: $\varepsilon_g = 10$; $N = 1{,}13 \times 10^{22}$ cm^{-3}; $\mu = 100$ cm^2/Vs; $m^* = 0{,}5\ m_0$; $d = 0{,}03$ μm.

tussen zichtbaar licht en infrarood mogelijk is: er zijn nl. voor de parameters zeer redelijke waarden gekozen.

Aan de halfgeleiders die voor gebruik in reflexiefilters in aanmerking zouden kunnen komen, dient voorts als eis gesteld te worden dat zij natriumlicht doorlaten. Dit betekent dat hun bandafstand ΔE groter dan 2,2 eV moet zijn. Vele halfgeleiders voldoen hieraan.

Tevens dient de concentratie der ladingdragers hoog te zijn: N mag niet kleiner zijn dan 10^{20} cm^{-3}. Aan deze eis is niet zo gemakkelijk te voldoen, daar de meeste halfgeleiders niet zo sterk gedoteerd kunnen worden. Er zijn echter een aantal oxiden, zoals CdO, Tl_2O_3, PbO_2 en SnO_2, waarbij concentraties hoger dan 10^{20} cm^{-3} bereikt kunnen worden.

Van deze oxiden heeft tinoxide (SnO_2), in de vorm van een dunne, op glas aangebrachte laag, veel toepassing gevonden. Mits op de juiste wijze bereid, onderscheiden SnO_2-laagjes zich door een goed elektrisch geleidingsvermogen en een grote doorlating voor zichtbaar licht. Ze zijn hierdoor bijzonder geschikt b.v. als

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

doorzichtige elektrode voor een elektroluminescerend plaatje en als elektrisch verwarmbare bedekking van glazen lichamen.

Meestal wordt de SnO_2-laag aangebracht door verstuiven. Hierbij wordt $SnCl_4$, te zamen met een organisch oplosmiddel zoals ethanol of butylacetaat, door middel van een straalpijpje verstoven in een oven die zich op een bepaalde temperatuur bevindt. Is deze temperatuur hoog genoeg, dan gaat het $SnCl_4$ over in SnO_2, dat zich als een dunne laag op het glasplaatje afzet. Een bijzonder goed geleidende laag wordt verkregen indien men de oorspronkelijke oplossing doteert met $SbCl_3$ [4] of HF [5]. Zulke lagen bezitten een aanzienlijke infraroodreflexie terwijl de grote doorlating van zichtbaar licht behouden blijft [6]. Metingen aan zulke lagen hebben aangetoond, dat voor golflengten boven 4 μm, d.w.z. in het gebied van sterke reflexie, de theorie van Drude voor het berekenen van het reflexievermogen uit de elektrische gegevens van de laag een zeer goede benadering is [7]. De hoogste ladingdragersconcentratie bereikten wij door te doteren met fluor. Het ziet ernaar uit dat men bij een concentratie van 6×10^{20} cm^{-3} de grens van de oplosbaarheid van fluor in het SnO_2-rooster bereikt heeft. Deze concentratie is echter hoog genoeg om een doeltreffende scheiding tussen natriumlicht en infrarood te verzekeren. Een voorwaarde is evenwel dat de dragers voldoende beweeglijk zijn. In tegenstelling tot de effectieve massa, die van het materiaal afhangt, kan de beweeglijkheid in sterke mate afhangen van de structuur van de laag. In de literatuur worden voor de beweeglijkheid in door verstuiving verkregen lagen waarden tussen 3 en 15 cm^2/Vs vermeld [6,8,9]. Een uitvoeriger onderzoek toonde aan dat de eigenschappen van deze lagen sterk afhangen van de temperatuur waarbij de verstuiving plaatsvindt. Reproduceerbare resultaten werden verkregen toen ervoor werd gezorgd dat tijdens het verstuiven de glasplaat en het verstoven mengsel dezelfde temperatuur bezaten. Met een verstuifinrichting, waarbij het te verstuiven mengsel door het doorlopen van een lange oven voldoende verwarmd wordt alvorens de glasplaat te bereiken, kon de invloed van de temperatuur op de eigenschappen van de laag worden nagegaan.

Fig. 9 toont het resultaat van dit onderzoek en geeft het verloop van de concentratie N van de ladingdragers en van hun beweeglijkheid μ (gemeten bij kamertemperatuur) als functie van de temperatuur T_S waarbij de

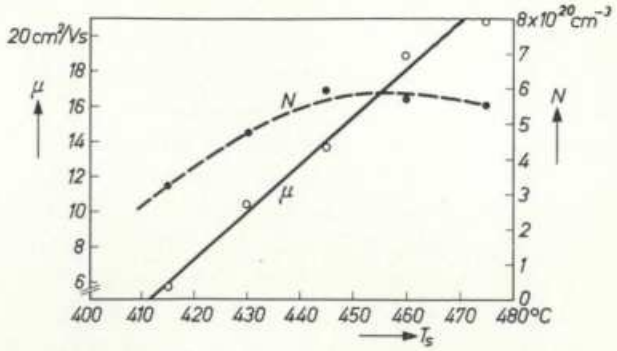


Fig. 9. De concentratie N van de ladingdragers en hun beweeglijkheid μ in SnO_2-lagen (gemeten bij kamertemperatuur) als functie van de temperatuur T_S waarbij het SnO_2 verstoven is.

verstuiving plaatsvindt. Terwijl N slechts weinig met T_S verandert, neemt de beweeglijkheid sterk met deze temperatuur toe en bereikt bij 475 °C een waarde van ca. 20 cm^2/Vs. Zoals te verwachten was, blijkt de infraroodreflexie met stijgende beweeglijkheid toe te nemen, en wel tot 80%. Men dient derhalve voor T_S een zo hoog mogelijke waarde te kiezen. Deze moet echter iets beneden 500 °C blijven, daar anders een ongewenste vertroebeling van de laag optreedt ten gevolge van een reactie van het verstoven mengsel met de glazen plaat. Voorts is voor het verkrijgen van een optimaal filter de laagdikte uiterst belangrijk. Deze dient zo groot gekozen te worden dat de infraroodreflexie van massief materiaal zeer dicht benaderd wordt. Om de hiertoe vereiste minimumdikte te bepalen, werd voor een golflengte van 5,5 μm de reflexie berekend als functie van de laagdikte; hierbij werd gerekend met de ladingdragerconcentratie en de beweeglijkheid die verkregen worden bij de gunstigste verstuivingstemperatuur ($N = 6\times10^{20}$ cm^{-3}, $\mu = 20$ cm^2/Vs).

Het resultaat (*fig. 10*) laat zien dat de reflexie met

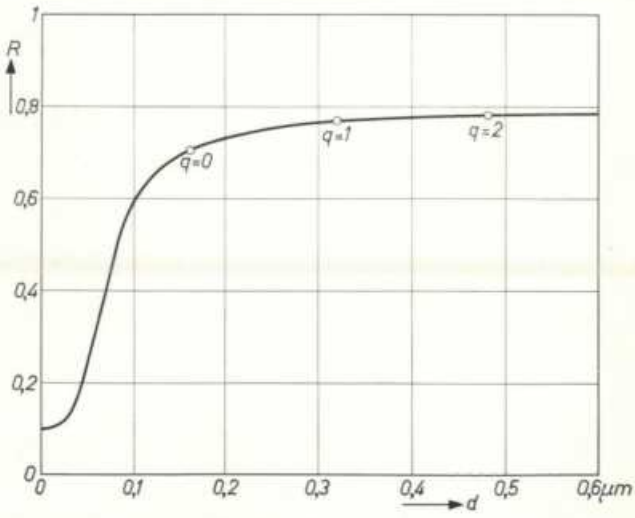


Fig. 10. Berekend reflexievermogen van SnO_2-lagen voor $\lambda = 5{,}5$ μm als functie van de laagdikte d voor een ladingdragersconcentratie N van 6×10^{20} cm^{-3} en een beweeglijkheid μ van 20 cm^2/Vs.

[4] J. M. Mochel, US-patent no. 2564706.
[5] W. O. Lytle en A. E. Jonge, US-patent no. 2566346.
[6] V. K. Miloslavskii en S. P. Lyashenko, Optics and Spectroscopy **8**, 455, 1960.
[7] R. Groth, E. Kauer en P. C. van der Linden, Z. Naturf. **17a**, 789, 1962.
[8] I. Imai, J. Phys. Soc. Japan **15**, 937, 1960.
[9] A. Fischer, Z. Naturf. **9a**, 508, 1954.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toenemende laagdikte sterker wordt en bij 0,3 μm vrijwel de waarde bereikt die voor het massieve materiaal geldt. Bij de diktes waar het hier om gaat, wordt de doorlating van zichtbaar licht grotendeels bepaald door de interferentie. Men moet derhalve trachten de laagdikte bovendien zodanig te kiezen dat deze correspondeert met de golflengte van de natriumlijnen. In fig. 10 zijn de werkpunten die aan deze interferentievoorwaarde voldoen, door cirkeltjes aangeduid. De desbetreffende laagdiktes van 0,16, 0,32 en 0,48 μm hebben resp. betrekking op interferentie van de nulde, eerste en tweede orde. Een laagdikte van 0,32 μm blijkt het meest doelmatig: het kiezen van een grotere dikte levert nauwelijks winst meer op. Werkt men daarentegen met de interferentie van de nulde orde, dan verliest men ongeveer 10% aan reflexievermogen.

In *fig. 11* vindt men een grafiek van de spectrale doorlating en van de reflexie van zulk een optimale laag van 0,32 μm dikte. In het infrarood wordt een reflexie van 80% bereikt, terwijl de doorlating voor natriumlicht 89% bedraagt. Deze laatste waarde ligt slechts weinig onder die voor een onbedekte glasplaat (92%). Metingen aan enige onder dezelfde omstandigheden vervaardigde lagen toonden aan dat de spreiding in de reflexie en de doorlating slechts ongeveer 1% bedraagt. Met hun lichtverlies van ongeveer 3% kan men deze SnO_2-lagen dus als nagenoeg verliesvrij beschouwen.

Bij metingen aan proeflampen (SO 140 W), waarvan de binnenzijde van de schutbuis met zulk een optimale SnO_2-laag bedekt was, bleken deze een rendement van 135 lm/W te hebben; bij lampen van de normale uitvoering is dit 100 lm/W. De lichtstroom was verminderd tot ongeveer 70% van de oorspronkelijke waarde. Het rendement kan bij dit type nog verder verhoogd worden dan met de thans bereikte 35%, indien men de schutbuis achterwege laat; bij gebruik van een goed reflecterend filter wordt deze buis nauwelijks meer verwarmd, hij veroorzaakt slechts onnodige reflexieverliezen van het natriumlicht. Op die wijze moet men voor de 140-W-lamp een rendement van ten minste 140 lm/W kunnen bereiken. Nog betere resultaten zijn te verwachten wanneer men de U-vormige ontladingsbuis vervangt door een rechte buis, die concentrisch door de reflector omgeven wordt. Indien men alle bovenomschreven mogelijkheden te baat neemt, zou het rendement van natriumlampen tot meer dan 150 lm/W verhoogd moeten kunnen worden.

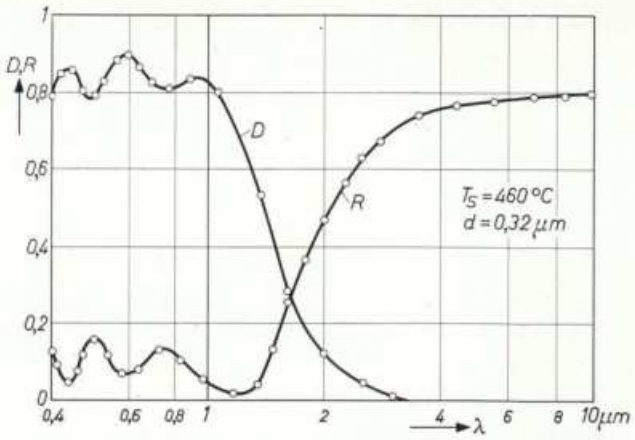


Fig. 11. Het verloop met de golflengte van de doorlating D en de reflexie R van een optimale SnO_2-laag van 0,32 μm dik.

Samenvatting. Bij een natriumlamp gaat energie verloren door warmtestraling van de ontladingsbuis. Door gebruik te maken van een selectief filter, dat de warmtestraling naar de ontladingsbuis terugkaatst doch het natriumlicht onverzwakt doorlaat, kan het rendement van de lamp aanzienlijk verbeterd worden. Voor praktische toepassing komen in het bijzonder filters in aanmerking die op de optische effecten van vrije ladingdragers berusten. Sommige metalen, zoals goud en koper, zijn van nature reeds geschikt als warmtereflexiefilters. De doorlating van natriumlicht kan bij deze lagen nog verbeterd worden door het aanbrengen van diëlektrische antireflexielagen. Uitgaande van sterk gedoteerd SnO_2 kan men filters maken die nagenoeg geen lichtverlies veroorzaken, maar wel de warmtestraling sterk reflecteren. Met behulp van zulke lagen kan het rendement van natriumlampen van het type SO 140 W verhoogd worden van ongeveer 100 lm/W tot 135 lm/W. Mogelijkheden voor een nog verdere verbetering worden ook besproken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Voorbeelden uit de fluorchemie en mogelijke technische toepassingen

J. Schröder

546.16

Fluor is in het periodiek systeem der elementen het eerste van de groep der halogenen. Zijn extreme plaats in dit systeem geeft reeds aanleiding te verwachten dat het element uitzonderlijke eigenschappen heeft. Het isoleren en het hanteren van het element, en ook het onderzoek in meer algemene zin, hebben aanvankelijk veel problemen opgeleverd — als gevolg voornamelijk van de buitengewoon grote affiniteit die fluor tot vrijwel alle andere elementen heeft. Inmiddels zijn echter deze moeilijkheden overwonnen en is het aantal bekende fluorverbindingen op waarlijk overrompelende wijze toegenomen. Bij onze huidige kennis van de fluorchemie laat het zich aanzien dat men met fluor een groter aantal anorganische verbindingen zal kunnen vormen dan met welk ander element ook.

De rol die de fluorchemie thans speelt in wetenschap en techniek hangt ten nauwste samen met het uitzonderlijke karakter van het fluor. Aan dit speciale karakter willen we eerst enige aandacht wijden, alsmede aan de bereiding en de hantering van het element, om vervolgens enige voorbeelden te geven van ons eigen werk op het gebied van de fluorchemie.

De bereiding en de hantering van fluor en fluorverbindingen

De bereiding van zuiver fluor geschiedt nog als voorheen door elektrolyse. Maar het procédé kan men thans in allerlei variaties uitvoeren, al naar dit voor het gebruiksdoel het beste uitkomt. Het oorspronkelijke Moissan-procédé, waarbij men fluorwaterstof aan elektrolyse onderwierp, wordt niet meer toegepast. Bij de moderne bereidingswijzen gaat men uit van een smelt van kaliumwaterstoffluoriden, waarbij men als mogelijkheid heeft het HF-gehalte te variëren (van KF.4HF tot KF.HF), en op deze wijze de smelt- en werktemperatuur te regelen (tussen 80 °C en 240 °C). Voor het kroes- en katodemateriaal heeft men bij dit procédé de keuze uit koper, monelmetaal, siliciumvrij ijzer en diverse ongelegeerde staalsoorten; als anodemateriaal gebruikt men koolstof of nikkel.

Om het fluor te zuiveren, leidt men het over droog natriumfluoride, dat het uit de generator meegevoerde fluorwaterstofgas adsorbeert. Een bijzonder zuiver produkt verkrijgt men indien men het bovendien nog door een met vloeibare zuurstof gekoeld condensatievat voert.

Bij voorkeur betrekt men fluor direct uit de generator. Zo nodig kunnen kleine hoeveelheden fluor voor enige tijd worden bewaard door het met behulp van vloeibare stikstof te doen condenseren in condensatievaten van kwarts, nikkel of koper. Het bewaren van fluor onder druk is gevaarlijk en mag slechts geschieden met inachtneming van bijzondere veiligheidsmaatregelen.

Voor het teweegbrengen van fluorreacties kan men behalve van fluor zelf ook uitgaan van fluor*verbindingen*. Hiertoe kan men alle verbindingen gebruiken die, door oxidatie of reductie, gemakkelijk fluor opnemen of afgeven. Dat zijn dus fluoriden van elementen die in verschillende valenties voorkomen, en dus in staat zijn om verschillende hoeveelheden fluor te binden. Als de belangrijkste noemen we CoF_3/CoF_2 en AgF_2/AgF. Dan zijn er de verbindingen waarbij fluor vrijkomt door thermische ontleding — de hierbij tevens vrijkomende nevenprodukten dienen dan wel inert te zijn of gemakkelijk te verwijderen door een verdere omzetting. Een goed voorbeeld is NF_3, een onder normale omstandigheden volkomen inert en gemakkelijk te hanteren gas, dat bij hogere temperatuur uiteenvalt in fluor en stikstof. Er zij nog een methode vermeld waarmee men in het bijzonder organische stoffen kan fluoreren — nog steeds zonder uit te gaan van fluor zelf —; de methode is de stof op te lossen in fluorwaterstof en dan aan elektrolyse te onderwerpen.

De belangrijkste bereidingswijzen van fluorverbindingen kan men in vier groepen verdelen:

1) Bereiding in waterige oplossing, b.v. het omzetten van oxiden, hydroxiden en carbonaten door fluorwaterstof. Dit is de meest gebruikelijke bereidingswijze voor gewone fluoriden, bifluoriden en complexe metaalfluoriden van normale valentie. De reactieprodukten bevatten meestal kristalwater.
2) Behandeling van halogeniden, oxiden en vele andere verbindingen met watervrij fluorwaterstof. Deze reactie moet meestal bij hoge temperatuur plaatsvinden en levert een watervrij fluoride van normale valentie op.
3) Directe reactie van elementen of verbindingen met fluor. Wegens de sterk oxiderende werking van fluor leidt deze bereidingswijze veelal tot hogere en voor een deel tot anomale valenties, en men ver-

Dr. J. Schröder is medewerker van het laboratorium Aken van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

krijgt produkten als AgF_2, CrF_5, MnF_5, WF_6, SF_6 en IF_7.

4) Warmtebehandeling van twee of meer gezamenlijk neergeslagen of gemengde fluoriden. Deze bereidingswijze gebruikt men vooral voor het verkrijgen van complexe verbindingen.

Voor het gebruiken van fluor dient men een bijzondere experimenteertechniek toe te passen, daar nagenoeg alle in het laboratorium gebruikte materialen door fluor worden aangetast. Glas reageert met fluor en vele fluorverbindingen onder vorming van SiF_4. De aantasting van organische laboratoriummaterialen, zoals rubber, polyethyleen, kranenvet enz. is soms bijzonder heftig. Ook vele metalen reageren reeds bij kamertemperatuur met fluor.

Kwartsglas is onder normale omstandigheden tegen fluor bestand, doch bij hogere temperaturen, en ook bij aanwezigheid van water of van organische stoffen, wordt het sterk aangetast. Gesinterd korund is zeer resistent, en calciumfluoridekeramiek kan zelfs zonder bezwaar tot 900 °C gebruikt worden. Van de metalen zijn behalve platina vooral nikkel, koper en aluminium tegen fluor bestand, daar zij door een beschermende fluoridelaag bedekt worden. Onderdelen die met zilversoldeer aan elkaar zijn gesoldeerd, moeten door een zware galvanische nikkellaag beschermd worden. Als organisch materiaal voor kolven, leidingen enz. komen in aanmerking polymeer tetrafluorethyleen en monochloortrifluorethyleen; ook als afdichtingsmateriaal zijn de genoemde stoffen heel geschikt. Laagpolymeer monochloortrifluorethyleen is uitstekend te gebruiken als een fluorvast kranen- en vacuümvet. *Tabel I* geeft voor een aantal belangrijke laboratoriummaterialen aan tot welke temperatuur men ze kan verhitten zonder dat er een noemenswaardige aantasting door fluor plaatsheeft.

Tabel I. Een aantal materialen die tegen fluor bestand zijn. *T* is de temperatuur waarbij het materiaal nog juist niet door fluor wordt aangetast.

Materiaal	*T* °C	Materiaal	*T* °C
Platina	300	Kwarts	100
Koper	350	Polytetra-	
Monelmetaal	400	fluorethyleen	100
Magnesium	400	Korund	700
Aluminium	450	CaF_2-keramiek	900
Nikkel	500		

Eigenschappen van fluor en fluorverbindingen

Vergelijkt men fluor met de overige halogenen en ook met de naburige chalcogenen, dan constateert men een aanzienlijk verschil in fysisch-chemische eigenschappen. Dit moge door de volgende feiten geïllustreerd worden. Met vrijwel alle elementen en verbindingen kan fluor reeds bij betrekkelijk lage temperatuur een reactie aangaan. Bij kamertemperatuur reageren metalen veelal onder vuurverschijnselen, en zo ook zwavel, borium, koolstof, silicium en zelfs asbest. Matige verwarming van oxiden en halogeniden is reeds voldoende om uit deze verbindingen de zuurstof of het desbetreffende halogeen door fluor te doen verdringen. Waterstof en de meeste hydriden reageren bijzonder heftig met fluor. Zelfs met edelgassen vormt fluor stabiele verbindingen.

De grote reactiviteit van fluor is enerzijds toe te schrijven aan het feit dat fluor met andere elementen de sterkste bekende enkelvoudige bindingen vormt. Ter illustratie hiervan geeft *tabel II* de dissociatie-energie van HX-verbindingen (X staat voor halogeen) en de gemiddelde energie van CX- en SiX-bindingen.

Tabel II. De energie van de fluorbinding vergeleken met die van andere halogeenbindingen (in kcal/mol bij 291 °K).

Dissociatie-energie		Gemiddelde energie per binding			
H-F	136	C-F	110,0	Si-F	132
H-Cl	102,1	C-Cl	67,0	Si-Cl	86
H-Br	85,9	C-Br	54,5	Si-Br	69

Anderzijds is de grote reactiviteit toe te schrijven aan de opvallend kleine dissociatie-energie van het molecuul F_2. Deze bedraagt 37,4 kcal/mol, tegenover 118 kcal/mol bij O_2, en 57,2 kcal/mol bij Cl_2. De dissociatie van F_2 begint reeds bij 400 °C merkbaar te worden, en de dissociatiegraad is bij vergelijkbare temperaturen groter dan die van Cl_2, Br_2 en O_2. Een verdere oorzaak van het agressieve gedrag van fluor is wellicht ook de hoge diffusiesnelheid van zijn relatief kleine moleculen en atomen.

Kenmerkend voor een deel der fluorverbindingen is hun sterk polaire karakter. Zo zijn de fluoriden van metalen met lage valenties sterker polair dan de overige metaalhalogeniden. Deze zoutachtige fluoriden hebben relatief grote roosterenergieën, en in hun eigenschappen komen ze meer overeen met de oxiden dan met de andere halogeniden. In vele gevallen kan het fluorion in de plaats van zuurstof of van de isoelektronische OH-groep treden. Terwijl b.v. $AlCl_3$ als overwegend homopolaire verbinding reeds bij 180 °C sublimeert, is AlF_3 een zeer weinig vluchtig zout (smeltpunt 1290 °C). De binding binnen het HF-molecuul is sterker dan in de andere halogeenwaterstoffen. Het proton kan slechts in geringe mate in de „starre" elektronenwolk van fluor binnendringen, en dit heeft een zeer groot dipoolmoment van 1,91 debye tot gevolg. Terwijl de overige halogeenwaterstoffen monomoleculair en uiterst vluchtig zijn ($kp._{HCl} = -83{,}7$ °C), zijn fluorwaterstofmoleculen door middel van waterstofbruggen tot ketens en ringen met elkaar verbonden, hetgeen fluorwaterstof heel wat minder vluchtig maakt

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

($kp._{HF}$ = 19,5 °C). De F-H-F-brugbinding is de sterkste waterstofbrugbinding die men kent. De vormingsenthalpie bedraagt voor de reactie $HF + F^- \rightarrow HF_2^-$ ongeveer 50 kcal/mol, en voor de reactie $2\,HF \rightarrow H_2F_2$ ongeveer 20 kcal/mol.

De fluoriden van de niet-metalen en die van de overgangsmetalen van hoge valentie zijn daarentegen typische molecuulverbindingen. De scheidingslijn tussen de zoutachtige en de vluchtige fluorverbindingen loopt diagonaal door het periodiek systeem, en wel van beryllium, via aluminium, titaan en tin, naar bismut. De verbindingen zijn des te vluchtiger naarmate de bindingspartner vollediger door fluor ingesloten is. Deze vluchtigheid is derhalve groter naarmate de valentie hoger is. Zo is b.v. WF_6 (molecuulgewicht 297,92; kookpunt 17,5 °C) het zwaarste gas dat we kennen, en koolstoffluoriden zijn vluchtiger dan koolwaterstoffen van hetzelfde molecuulgewicht. De afscherming door fluor is zo sterk dat bij moleculen die dicht door fluor zijn omringd, de intermoleculaire krachten vergelijkbaar zijn met die van de edelgassen (zie *tabel III*).

Tabel III. De kookpunten van fluoriden vergeleken met die van ongeveer even zware chloriden, koolwaterstoffen en edelgassen.

Verbinding	SF_6	C_2F_6	$C_{10}H_{22}$	CCl_4	Xe
Molecuulgewicht	146	138	142,3	153,8	131,3
Kookpunt in °C	—64	—78,3	+147	+ 76,8	—112

Sommige fluoriden, b.v. SF_6, NF_3, CF_4 en hogere homologe verbindingen, zijn ook wat hun chemisch gedrag betreft aan de edelgassen verwant; zij zijn tot bij relatief hoge temperatuur volkomen inert.

Een bijzonder kenmerk der fluorverbindingen is wel hun extreem grote vormingswarmte en thermische stabiliteit vergeleken met alle andere verbindingen. Het zijn deze eigenschappen van de fluorverbinding die ook in de nu volgende toepassingsvoorbeelden een belangrijke rol spelen.

Lichtopwekking door fluorreacties in verbrandingsflitslampen

Voor de produktie van licht in verbrandingsflitslampen gebruikt men tot nu toe uitsluitend de verbranding van stoffen in zuurstof. Als te verbranden stof gebruikt men, behalve nog enkele andere metalen, hoofdzakelijk zirkonium. Van de eisen die men aan een bruikbare flitslamp mag stellen, willen wij hier slechts drie van de belangrijkste noemen. In de eerste plaats moet zulk een lamp gedurende een korte tijd (enkele milliseconden) een zo groot mogelijke hoeveelheid licht uitstralen. Daar men het normale fotografische materiaal zo goed mogelijk geschikt tracht te maken voor belichting met daglicht, is een tweede belangrijke eis dat de kleurtemperatuur van het flitslicht zoveel mogelijk met die van daglicht moet overeenkomen. Het lampje moet voorts klein, handig en veilig zijn; d.w.z. het mag uiteraard bij het flitsen niet springen.

In principe is een verbrandingsflitslamp een thermische straler. De reactiewarmte van een verbranding wordt gebruikt om de te verbranden of reeds verbrande stof te verhitten en zodoende tot straling te brengen. Zoals bekend, neemt de emissie van zichtbare straling sterk toe bij verhoging van de temperatuur van het stralingslichaam. Het visuele rendement (fotometrisch stralingsequivalent) van de totale straling van een zwart lichaam bereikt een maximum bij 6500 °K, de temperatuur van het zonneoppervlak. De temperatuur van de bij de verbranding betrokken stoffen moet dus zo hoog mogelijk zijn ten einde een groot lichtrendement en een hoge kleurtemperatuur te bereiken. Dit betekent dat de verbrandingsreactie in een zeker tijdsbestek zoveel mogelijk energie per omgezette hoeveelheid substantie dient te leveren. Voor reacties bij normale temperatuur en constante druk is deze energie gelijk aan de bindingsenthalpie ΔH, d.i. de energieverandering van het systeem per omzetting van b.v. een gramatoom van een der betrokken stoffen. Bij de reacties worden temperaturen bereikt waarbij de reactieprodukten niet langer stabiel zijn. Zo wordt dus aan een verdere temperatuurverhoging een grens gesteld door dissociatie. Om hoge temperaturen te bereiken, dienen de betrokken stoffen zo stabiel mogelijk te zijn. De stabiliteit hangt af van de vrije bindingsenergie, die weer berekend kan worden uit de bindingsenthalpie en andere thermodynamische gegevens.

In *fig. 1* zijn de vrije bindingsenergieën ΔG in kcal

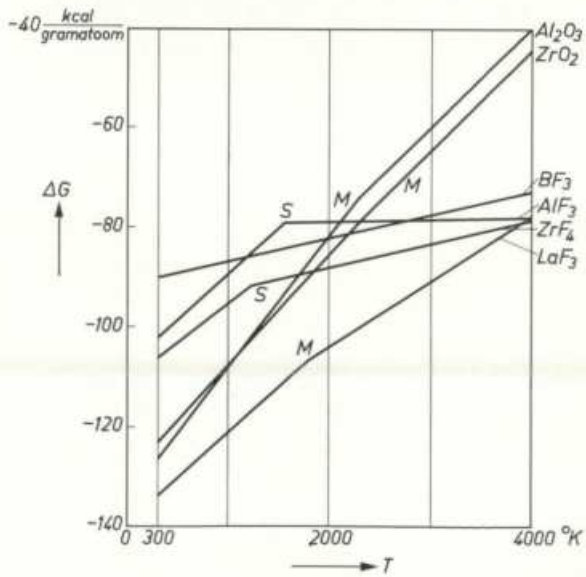


Fig. 1. De vrije bindingsenergie ΔG per gramatoom zuurstof van enige oxiden vergeleken met de vrije bindingsenergie per gramatoom fluor van enkele fluoriden, in het temperatuurinterval van 300 °K tot 4000 °K. *M* smeltpunt, *S* sublimatiepunt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

per gramatoom fluor en zuurstof van resp. fluoriden en oxiden uitgezet tegen de temperatuur. Bij het vergelijken van b.v. ZrO_2 en ZrF_4 baseert men zich in dit geval op de omzettingen: $\frac{1}{2}Zr + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow \frac{1}{2}ZrO_2$; $\frac{1}{4}Zr + \frac{1}{2}F_2 \rightarrow \frac{1}{4}ZrF_4$. (Betrekt men de energie op gelijke hoeveelheden van de andere in de reactie betrokken stof, i.c. Zr, dan verkrijgt men tweemaal zo grote waarden voor de vrije energie van de fluoriden.)

Wanneer men de verschillende curven in de figuur vergelijkt, ziet men dat de reacties met fluor zich kunnen voltrekken bij hogere temperaturen dan die met zuurstof. Ten einde behalve een aanzienlijke reactiewarmte ook een hoge kleurtemperatuur te kunnen bereiken, verdient het dus aanbeveling de verbranding met fluor in plaats van, zoals tot nu toe gebeurde, met zuurstof te doen geschieden.

Daar met fluor zelf moeilijk te werken is, geeft men de voorkeur aan gasvormige fluorverbindingen, die een zo hoog mogelijk fluorgehalte paren aan een geringe thermische stabiliteit, en die onder normale omstandigheden chemisch minder agressief zijn dan fluor (b.v. OF_2, $\Delta H = +7{,}6$ kcal/mol; of NF_3, $\Delta H = -27$ kcal/mol).

Voor de energiebalans van de verbranding is het gebruik van zulke fluoriden om twee redenen gunstig; niet alleen telt de gemakkelijke thermische ontleedbaarheid van deze verbindingen, maar ook het feit dat ze meer dan twee bindingen per molecuul bevatten, en ze derhalve, bij gelijk gasvolume en gelijke druk, meer vrije valenties voor de reactie beschikbaar hebben dan moleculair fluor. Bij OF_2 worden behalve de fluorvalenties nog twee zuurstofvalenties benut. Voor het omzetten van dezelfde hoeveelheid materie kan men dus een dienovereenkomstig kleiner lampvolume gebruiken. Als voorbeeld hiervan geven wij de reactievergelijkingen van de verbranding van zirkonium met telkens gelijke volumina O_2, NF_3 en OF_2, en de bijbehorende waarden van de bindingsenthalpie:

$2\,O_2 + 2\,Zr \rightarrow 2\,ZrO_2$ —516 kcal,
$2\,NF_3 + 1\frac{1}{2}\,Zr \rightarrow 1\frac{1}{2}\,ZrF_4 + N_2$ —630 kcal,
$2\,OF_2 + 2\,Zr \rightarrow ZrF_4 + ZrO_2$ —729 kcal.

De belangrijkste conclusies die we tot nu toe hebben verkregen uit onze experimenten met fluorreacties in flitslampen [1] komen in het kort hierop neer:

1) Zowel met fluor als met een aantal fluorverbindingen (b.v. NF_3 en OF_2) is het mogelijk door een reactie met fijnverdeelde metalen (b.v. Zr) licht te produceren.
2) De kleurtemperatuur van het bij fluorreacties uitgezonden licht is hoger dan die bij overeenkomstige zuurstofreacties.
3) Bij een gelijke hoeveelheid omgezette materie is de verkregen hoeveelheid licht in vele gevallen groter dan bij verbranding met zuurstof.

Transportreacties in elektrische gloeilampen

Het lichtrendement en de helderheid van een elektrische gloeilamp nemen aanzienlijk toe bij verhoging van de temperatuur van het gloeilichaam. Als materiaal voor een gloeilichaam komen derhalve slechts stoffen met een zeer hoog smeltpunt in aanmerking, zoals wolfraam (3370 °C), koolstof (ca. 3750 °C) en tantaalcarbide (3880 °C). De dampspanning van deze stoffen is echter bij temperaturen onder het smeltpunt reeds zo hoog, dat steeds verdamping van het gloeilichaam, zwarting van de ballon en ten slotte breuk van de gloeidraad het gevolg is.

Het gloeilichaam verdampt niet gelijkmatig. Zelfs bij gloeilichamen die met de grootste nauwkeurigheid zijn vervaardigd, zijn er, als gevolg van gedeeltelijk nog onopgehelderde oorzaken, altijd enkele plekjes die heter zijn dan met de gemiddelde temperatuur van het gloeilichaam overeenkomt. Men kan deze zg. „hot spots", ongeacht hun eigenlijke aard, in principe als plaatselijke vernauwingen van de gloeidraad opvatten. Wegens de geringe doorsnede en de overeenkomstig hogere elektrische weerstand is de temperatuur op deze plaatsen verhoogd. Dit heeft op zijn beurt een snellere verdamping ten gevolge, hetgeen tot een verdere afneming van de diameter leidt. Daar de totale weerstand van het gloeilichaam door één dunne plaats nauwelijks beïnvloed wordt, is het te begrijpen dat de draad altijd op zulk een heet punt zal doorbranden.

Door chemische transportreacties met fluor kan het optreden van zulke „spots" en ook het doorbranden van de hete gloeidraad, alsmede het zwart worden van de ballon door verdamping, in principe vermeden worden [2].

Fluor is het enige element dat reeds bij kamertemperatuur reageert met wolfraam of koolstof, onder vorming van de gasvormige fluoriden WF_6 en CF_4. Bij aanwezigheid van fluor in de gasvulling van de lamp wordt de verdampte gloeilichaamsubstantie in het gasvormige fluoride omgezet, om vervolgens door thermische dissociatie wederom op het hete gloeilichaam te worden afgezet. Zo lang dit kringproces op gang blijft, hetgeen bij elke ballontemperatuur het geval is, wordt zwarting van de ballon tegengegaan (*fig. 2*).

De dissociatie van wolfraamfluoride en de afschei-

[1] Een zeer belangrijk aandeel in dit werk heeft gehad L. M. Nijland van de Hoofdindustriegroep Licht te Eindhoven — zowel wat betreft het idee om fluorreacties in flitslampen toe te passen als in de hiertoe uitgevoerde experimenten. Een uitvoerige beschrijving van deze lampen zal te zijner tijd in dit Tijdschrift verschijnen.

[2] De grondslagen van de chemische transportreacties worden uitvoerig beschreven in het boek: H. Schäfer, Chemische Transportreaktionen, Verlag Chemie, Weinheim 1962.

[3] W. Schilling, Elektrotechn. Z. **B 13**, 485, 1961.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ding van wolfraam geschiedt pas bij zeer hoge temperatuur, in de onmiddellijke nabijheid van het hete gloeilichaam. Bij andere halogenen, en in het bijzonder bij jodium, welk laatste element in de bekende jodiumgloeilamp toepassing gevonden heeft, geschiedt deze afscheiding reeds bij de betrekkelijk lage temperatuur in het omringende gas, waardoor er zich een wolk van atomair wolfraam rondom het gloeilichaam vormt[3]. Weliswaar heeft ook dit reeds een positief resultaat, doch de situatie is bij fluor in principe gunstiger, zoals uit het volgende moge blijken.

De kinetische processen in de lamp zijn zeer complex en kwantitatief moeilijk te begrijpen; de complicerende factor is dat er zeer hoge temperatuur- en concentratiegradiënten optreden, die een convectiestroming doen ontstaan. Voor een kwalitatieve beoordeling kan men de situatie vereenvoudigen door aan te nemen dat er zich in de onmiddellijke nabijheid van het gloeilichaam een dunne gaslaag in rust bevindt, een laag derhalve met vrijwel dezelfde temperatuur als het eronder gelegen oppervlak van het gloeilichaam. In dit geval kunnen wij in eerste benadering van evenwichtsvoorwaarden spreken, en voor het dissociatie-evenwicht $WF_6 \rightleftarrows W + 6\,F$ de wet van de massawerking opschrijven:

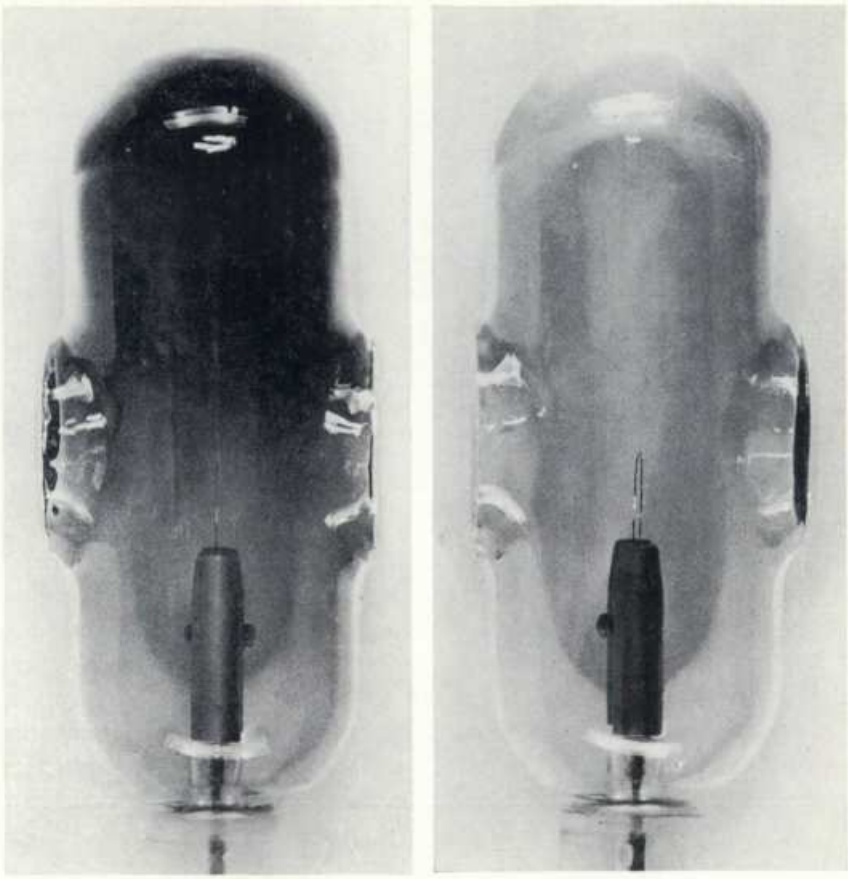
$$\frac{P_W (P_F)^6}{P_{WF_6}} = K_p .$$

Volgens Van 't Hoff hangt de evenwichtsconstante K_p af van de temperatuur volgens:

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2} .$$

Hierin is ΔH de bindingsenthalpie en R de gasconstante. Voor het verdampingsevenwicht $W_s \rightleftarrows W_g$ bestaat volgens Clausius-Clapeyron, voor wat betreft de afhankelijkheid van de dampspanning van de temperatuur, formeel dezelfde betrekking, waarbij echter de verdampingsenthalpie Q de plaats van ΔH inneemt:

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{Q}{RT^2} .$$



a *b*

Fig. 2. *a*) Wolfraamlamp waarvan de gloeidraad 10 uur gebrand heeft bij 3000 °C in 500 torr argon. Er is een aanzienlijke zwarting door verdampt wolfraam.
b) Dezelfde lamp nadat de gloeidraad 15 minuten gebrand heeft op 3100 °C in 500 torr argon + 2 torr WF_6. De zwarting is nu vrijwel verdwenen.

In *fig. 3* zijn benaderde waarden voor log K_p en log P, welke berekend zijn volgens de methode van Ulich, uitgezet als functie van de temperatuur. Uit dit dia-

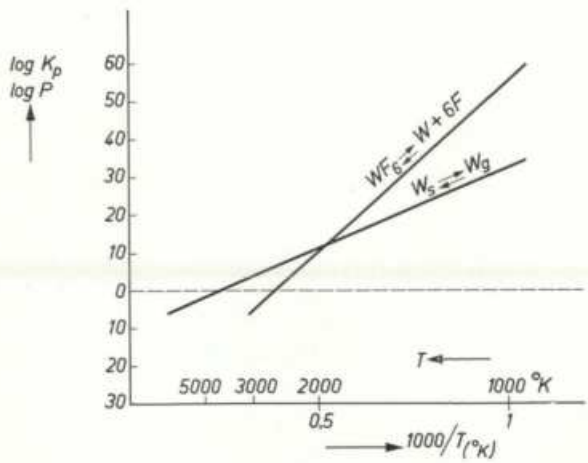
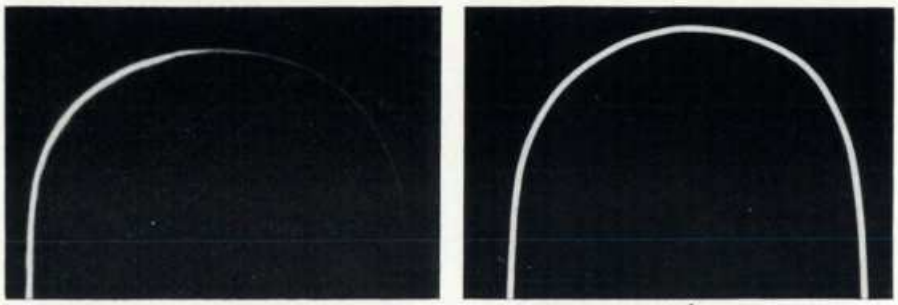


Fig. 3. De variatie van het dissociatie-evenwicht $WF_6 \rightleftarrows W + 6F$ en van het verdampingsevenwicht $W_s \rightleftarrows W_g$ met de temperatuur. K_p evenwichtsconstante van de dissociatie van WF_6, P wolfraamdampspanning, T absolute temperatuur.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



a *b*

Fig. 4. *a*) Filmopname van een wolfraamgloeidraad onmiddellijk na het inschakelen van de lamp. De linkerhelft van de draadboog is dunner dan de rechter. De temperatuur van het linkergedeelte is 3100 °C en die van het rechtergedeelte 2800 °C.
b) Filmopname van dezelfde wolfraamgloeidraad als in (*a*) na 10 minuten branden in 500 torr argon + 2 torr WF_6. De aanvankelijke ongelijkmatigheid in geometrie en temperatuur is verdwenen. De draad is thans door het chemische transport met WF_6 als medium volkomen homogeen geworden.

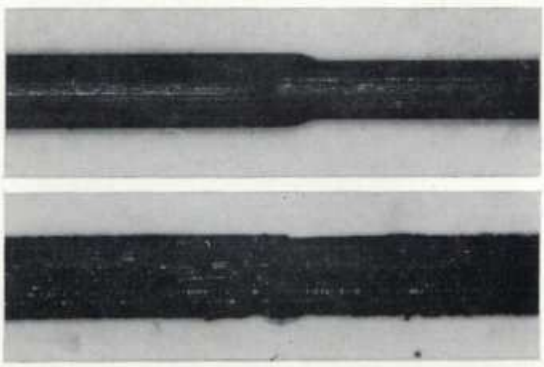
gram blijkt het volgende:

1) Juist in het temperatuurgebied dat als gloeitemperatuur voor wolfraamgloeilampen in aanmerking komt, begint een duidelijke dissociatie van WF_6 merkbaar te worden.
2) De dissociatie van WF_6 is aanzienlijk sterker van de temperatuur afhankelijk dan de dampspanning van wolfraam. Dit heeft tot gevolg dat indien op de een of andere plaats van het gloeilichaam de temperatuur wordt verhoogd, de afzetting van wolfraam door dissociatie sterker toeneemt dan de verdamping van wolfraam. Hierdoor wordt er net zo lang wolfraam naar deze hetere plaats getransporteerd totdat de temperatuur aldaar gelijk is aan de gemiddelde temperatuur van het gloeilichaam.

In tegenstelling tot de overige (zuivere) halogeniden, die reeds bij aanzienlijk lagere temperaturen voor een groot deel gedissocieerd zijn en waarbij de afhankelijkheid van deze dissociatie van de temperatuur geringer is dan die van de dampspanning van de desbetreffende gloeidraadmaterie, kan het fluoride dus een homogenisering van het gloeilichaam bewerkstelligen. Ter verduidelijking en bevestiging van dit regeneratieve transport volgen hier nog enige experimentele resultaten.

Van een gloeilichaam van wolfraamdraad wordt een kort stuk elektrolytisch geëtst. De aldus verkregen vernauwing vormt een kunstmatige „hot spot", waarvan de temperatuur hoger is dan die van de rest van de gloeidraad. Wanneer men deze lamp laat branden met een gasvulling die enkele torr WF_6 of NF_3 bevat, dan blijkt dat reeds na een korte brandtijd de gloeidraad zowel wat diameter als wat temperatuur betreft over zijn gehele lengte homogeen geworden is. *Fig. 4a* toont een filmopname van een aan de linkerkant geëtste gloeidraad onmiddellijk na het inschakelen van de lamp; fig. 4*b* toont een filmopname van dezelfde draad na een korte brandtijd bij 3100 °C in een WF_6-atmosfeer. *Fig. 5a* is een microfoto van de plaats van overgang van ongeetste naar geëtste draad, en fig. 5*b* toont dezelfde plaats na een korte brandtijd in een WF_6-atmosfeer.

Samenvattend kan men dus zeggen dat de transportreacties met fluor als medium verhinderen dat het hete gloeilichaam doorbrandt en dat de ballon op den duur zwart aanslaat als gevolg van verdamping en daaropvolgende neerslag van de gloeidraadsubstantie. De fluorgloeilamp verdraagt dus een werktemperatuur van de gloeidraad welke maar weinig onder het smeltpunt ligt. Door de gloeitemperatuur te verhogen, kan men een aanzienlijk hoger lichtrendement en een grotere helderheid verkrijgen dan tot op heden mogelijk was. Wel dient te worden vermeld dat de tot nu bereikte resultaten verkregen zijn met op het laboratorium uitgevoerde experimenten en dat nog heel wat problemen opgelost zullen moeten worden voordat de huidige experimentele lamp met fluorkringproces tot een praktisch bruikbare lichtbron ontwikkeld is.



a

b

Fig. 5. *a*) Wolfraamdraad waarvan het rechtergedeelte door etsen aanzienlijk dunner gemaakt is.
b) Dezelfde plaats van de wolfraamdraad na een brandtijd van 15 minuten op 3000 °C in 500 torr argon + 2 torr WF_6.

Samenvatting. De huidige grote betekenis der fluorchemie in wetenschap en techniek berust op de bijzondere eigenschappen van fluor en zijn verbindingen. Van alle elementen is fluor het meest reactief. Reeds bij betrekkelijk lage temperatuur kan het met bijna alle andere elementen en verbindingen reageren. Om met dit agressieve element en zijn verbindingen te kunnen werken, is een bijzondere experimenteertechniek vereist.

In dit artikel wordt een overzicht gegeven van de fluorchemie. Er is een korte beschrijving van de bereiding, aandacht wordt gegeven aan de wijze waarop het agressieve fluor en zijn verbindingen moeten worden gehanteerd, enkele belangrijke eigenschappen worden besproken, en vervolgens worden twee eigen bijdragen tot de fluorchemie vermeld. De eerste van deze bijdragen betreft fluorreacties die, dank zij hun grote reactie-energie, geschikt zijn om actinisch licht in verbrandingsflitslampen op te wekken. In de tweede beschreven toepassing wordt van de reactiviteit van fluor en de grote stabiliteit van fluoriden gebruik gemaakt om chemische transportreacties bij uiterst hoge temperaturen in het inwendige van de gloeilamp tot stand te brengen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Chemische transportreacties

A. Rabenau

536.422:548.55

Men spreekt van een chemische transportreactie als men een vast of vloeibaar substraat $A_{(v)}$ via een gasvormige faze transporteert door middel van een chemische reactie, dat wil zeggen dat men gasvormige stoffen $B_{(g)}$, $C_{(g)}$, $D_{(g)}$ ... laat deelnemen aan een reactie volgens het schema:

$$A_{(v)} + B_{(g)} \rightleftarrows C_{(g)} + D_{(g)} + \ldots$$

Dit proces verschilt dus fundamenteel van sublimatie of destillatie. Essentieel is dat de reactie reversibel is; bij een bepaald concentratieverval, dat men b.v. door middel van een temperatuurgradiënt instelt, voltrekt zich de „omgekeerde" reactie, onder afscheiding van A. Zulke reacties zijn in de techniek reeds lang belangrijk. Wij denken hierbij b.v. aan het Mond-Langer-proces voor het zuiveren van nikkel via het carbonyl:

$$Ni_{(v)} + 4\,CO_{(g)} \rightleftarrows Ni(CO)_{4(g)}, \quad 50 \rightarrow 190\ ^\circ C,$$

en voorts aan het procédé volgens Van Arkel, De Boer en Fast voor de bereiding van zuivere metalen:

$$Zr_{(v)} + 2\,I_{2(g)} \rightleftarrows ZrI_{4(g)}, \quad 280 \rightarrow 1450\ ^\circ C.$$

Nadat Schäfer [1] de gemeenschappelijke grondslagen van het principe had uitgewerkt en op de vele toepassingsmogelijkheden gewezen had, begon men op verscheidene plaatsen dit onderwerp systematisch te bestuderen. In de elektrotechniek zijn hierbij twee toepassingsgebieden vooral belangrijk geworden, en wel

1) het maken van monokristallen, en
2) het maken van dunne en in het bijzonder van epitactische lagen.

Wij willen in dit artikel nader ingaan op het eerste probleem.

In vergelijking met sublimatie heeft chemisch transport het voordeel dat — bij de temperatuur waarbij het transport plaatsvindt — de dampspanning van het substraat in het algemeen verwaarloosbaar klein is. Hierdoor heeft men het voordeel bij aanzienlijk lagere temperaturen te kunnen werken dan bij sublimatie mogelijk zou zijn. Dit stelt ons in staat te werken met stoffen die bij sublimatie, ter verkrijging van een voldoend hoge dampspanning, dermate hoge temperaturen zouden vereisen dat de keuze van het kroesmateriaal en het vermijden van verontreinigingen een ernstig, zo niet onoplosbaar, probleem zouden worden. Het stelt ons voorts in staat verbindingen te transporteren die reeds beneden hun smeltpunt ontleden en hierdoor drukken doen ontstaan die men met de eenvoudige hulpmiddelen van het laboratorium niet kan beheersen. De mogelijkheid om bij lagere temperaturen te werken, stelt ons ten slotte dikwijls in staat bepaalde fazeovergangen te vermijden, welke anders de monokristallijne structuur zouden vernietigen.

Een nadeel is de bestaande mogelijkheid dat het transportmiddel in het rooster van het afgescheiden kristal wordt opgenomen. Hier staat weer tegenover dat men tot op zekere hoogte vrij is om een transportmiddel te kiezen dat bepaalde eigenschappen van het kristal, b.v. het geleidingsvermogen, niet beïnvloedt, en trouwens ook dat men kan trachten een transportmiddel te vinden dat om redenen van kristalchemische aard slechts in een te verwaarlozen mate opgenomen wordt.

Voor de keuze van een geschikt transportmiddel en van de in te stellen temperaturen kan men zich laten leiden door thermodynamische gegevens. Met deze — en ook met andere vraagstukken, zoals de grootte van het transporteffect — heeft Schäfer zich in de aangehaalde studie [1] uitvoerig beziggehouden.

Bij het maken van monokristallen wenst men niet zelden kristallen van aanzienlijke afmetingen te kweken. De gebruikelijke werkwijze, waarbij een constante temperatuurgradiënt in het systeem wordt onderhouden, leidt echter slechts in gunstige gevallen tot kristallen van een of enkele centimeters grootte. De grote kans op kiemvorming bij de heersende graad van oververzadiging leidt doorgaans tot de vorming van een groot aantal zeer kleine kristallen. In de laatste jaren is in dit laboratorium een methode ontwikkeld die het ondanks deze en andere moeilijkheden in vele gevallen mogelijk maakt grotere kristallen te verkrijgen.

Ons probleem was oorspronkelijk om kristallen van galliumfosfide te laten groeien. GaP smelt bij ca. 1470 °C onder een dampspanning van fosfor van ongeveer 30 atm. Derhalve was het bezwaarlijk om uit te gaan van de smelt, voor het toepassen van de gebruikelijke kweekmethode. Het lag toen voor de hand om het met een chemisch transportproces te proberen. Het bleek dat zulk een transport mogelijk is met behulp van b.v. jodium bij een temperatuurverval van 1000 °C tot 900 °C. Wat men op deze wijze verkreeg, was echter slechts een groot aantal microkristallen. Maak [2]

Dr. A. Rabenau is medewerker van het laboratorium Aken van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

[1] H. Schäfer, Chemische Transportreaktionen, Verlag Chemie, Weinheim 1962.
[2] I. Maak, niet gepubliceerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

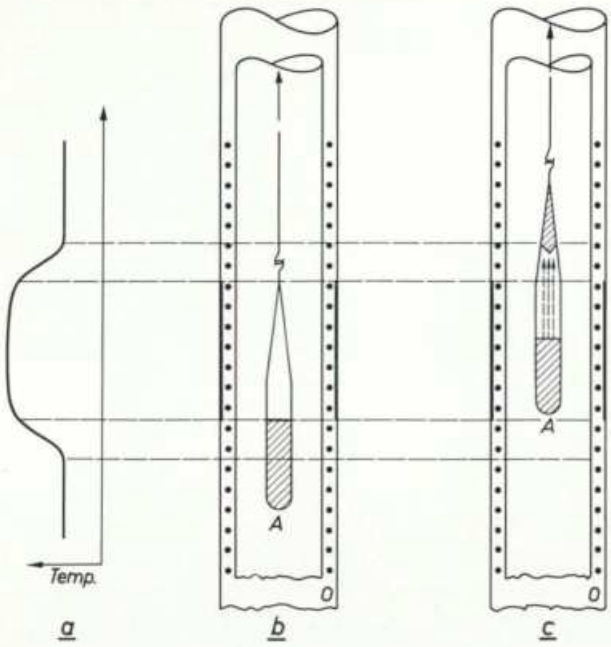


Fig. 1. Principe van de transport-trekmethode, waarbij gebruik wordt gemaakt van chemische transportreacties. *a*) Temperatuurverloop, *b*) toestand bij de aanvang van het proces, en *c*) tijdens het verloop van het proces. De ampul *A* hangt in de oven *O*, bestaande uit twee in elkaar geschoven kwartsglazen buizen, waarvan de binnenste omwikkeld is met een verwarmingsdraad. Een deel van de binnenzijde van de buitenste buis is voorzien van een dunne goudlaag (dikke lijn), die de infrarode straling reflecteert en aldus de temperatuur in deze sector verhoogt (vgl. *a*).

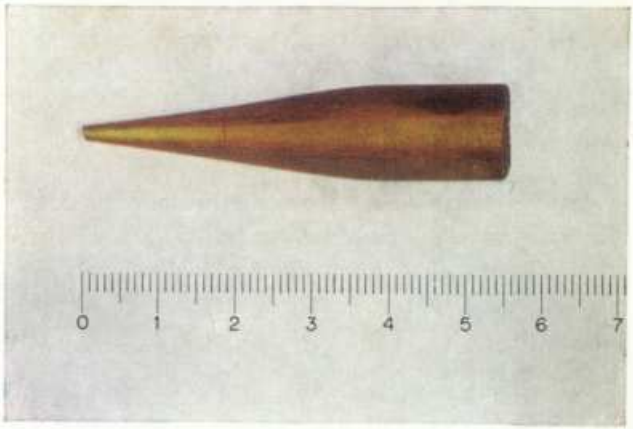


Fig. 2. Resultaat van een proefneming met de transport-trekmethode: GaP-monokristal, in lengtedoorsnede.

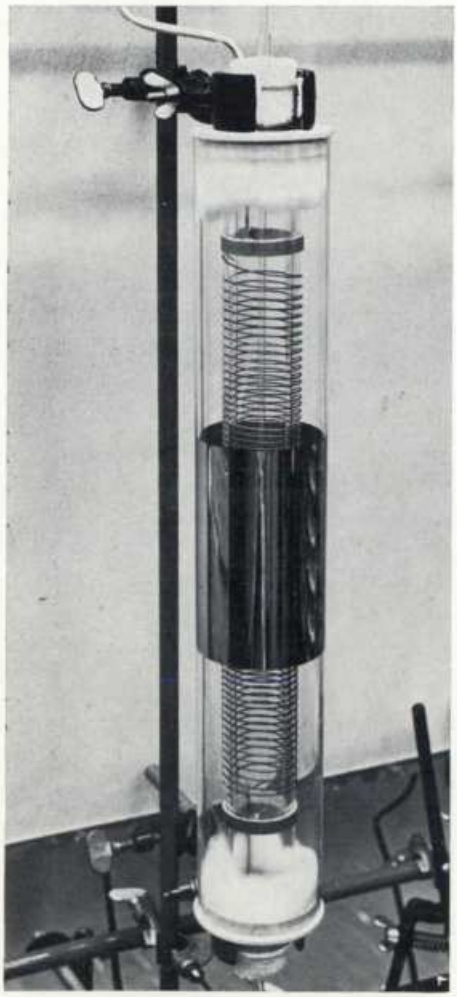


Fig. 3

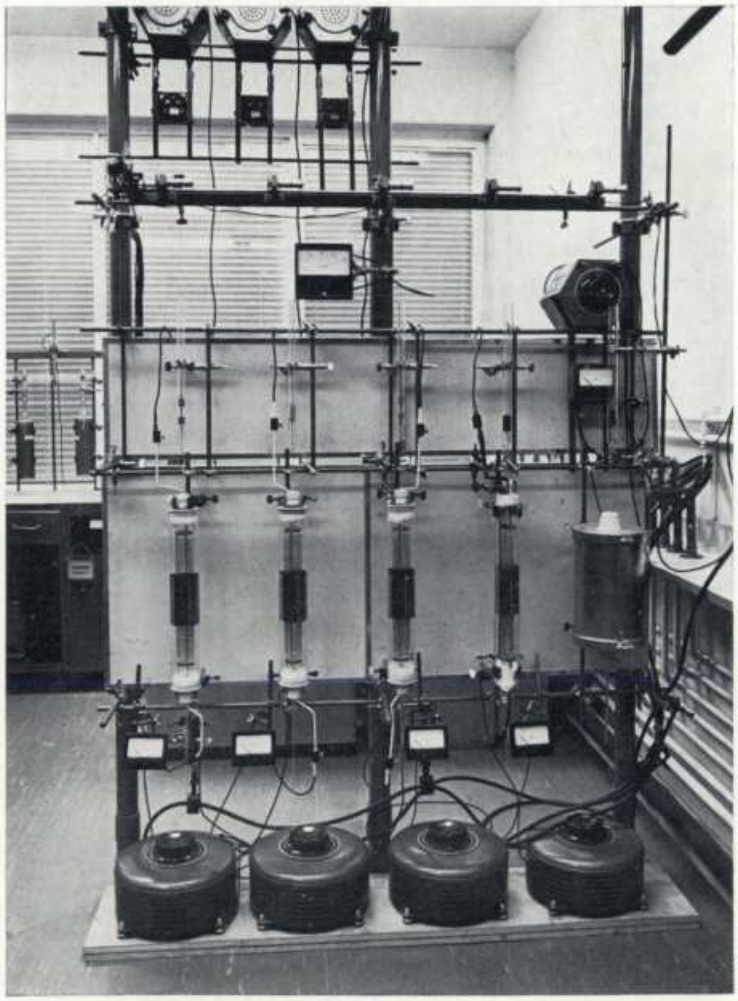


Fig. 4

Fig. 3. Trekoven volgens het beschreven principe. Het verwarmingselement en de goudlaag zijn duidelijk zichtbaar. De goudlaag laat licht door, zodat men de ampul, terwijl hij wordt voortgetrokken, kan blijven waarnemen.
Fig. 4. Batterij van vier kristaltrekovens met bijbehorende voedings- en trekapparatuur.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kreeg toen het idee de transportmethode te combineren met een methode, gebruikelijk bij het vormen van kristallen uit de smelt, waarbij slechts één of enkele kiemen van gunstige oriëntatie de gelegenheid wordt gegeven om uit te groeien. Bij de verdere ontwikkeling, waartoe een groot aantal medewerkers hebben bijgedragen, is hieruit een methode ontstaan waarmee niet alleen dit speciale probleem kon worden opgelost, maar die ook meer algemeen bruikbaar bleek te zijn, en daarom hieronder beschreven zal worden.

De transport-trekmethode

Het principe van de methode is schematisch voorgesteld in *fig. 1*. De te transporteren stof bevindt zich te zamen met het transportmiddel in een ampul van kwarts, die naar boven toe in een punt is uitgetrokken. Deze punt komt bij het optrekken van de ampul het eerst in de zone waar de hoogste temperatuur heerst. Hierbij worden de kristallieten die zich tijdens het stijgen van de temperatuur aan het oppervlak hebben afgezet, en die tot kiemvorming aanleiding kunnen geven, „weggetransporteerd", waardoor in de punt en omgeving een schoon oppervlak verkregen wordt. Wordt de ampul verder opgetrokken, dan komt op zeker ogenblik het substraat in de zone van de hoogste temperatuur en tegelijkertijd treedt de punt een minder hete zone binnen; hierna begint de afscheiding. De vorm van de punt is zodanig dat er zich zo weinig mogelijk groeikiemen vormen, zodat ten slotte maar enkele kristallen, en onder gunstige omstandigheden zelfs maar één enkel kristal, over de gehele doorsnede verder groeien. Op deze wijze kan men kristallen van verscheidene centimeters lengte verkrijgen, zoals het voorbeeld van *fig. 2* laat zien. Tot nu toe heeft men aldus GaP en GaAs kunnen transporteren, alsook mengkristallen van GaAs en GaP van bepaalde samenstelling.

Fig. 3 toont een kristaltrekoven. Deze bestaat uit twee in elkaar geschoven kwartsbuizen, waarvan de binnenste met een verwarmingsdraad omwikkeld is. Een gedeelte van de binnenzijde van de buitenste buis is voorzien van een ca. 0,05 μm dikke, opgedampte goudlaag. De sterke infraroodreflexie van zulk een laag — zichtbaar licht wordt wel doorgelaten — beperkt de uitstraling van warmte en veroorzaakt een hogere temperatuur in het desbetreffende deel van de buis.

In *fig. 4* zien we een aantal van zulke ovens die tot een batterij zijn samengevoegd. Op de voorgrond ziet men het voedingsgedeelte, terwijl boven de ovens het trekmechanisme zichtbaar is.

Samenvatting. In dit artikel wordt de toepassing beschreven van chemische transportreacties voor de vervaardiging van monokristallen. Besproken worden de voor- en nadelen van deze transportreacties, in het bijzonder in vergelijking met sublimatie.

Voor het maken van grote monokristallen heeft men de zg. transport-trekmethode ontwikkeld. Hierbij wordt een tot een punt uitgetrokken ampul van kwarts, onder de vereiste voorwaarden voor een transportreactie, door een oven met de juiste temperatuurgradiënt getrokken. De uitgetrokken punt bevordert gedurende het groeiproces dat er zich slechts een enkele groeikiem vormt. Voor de beschrijving van apparatuur en techniek is als voorbeeld het maken van monokristallen van galliumfosfide genomen.

Onderzoekingen aan halfgeleiders van $BaTiO_3$

E. Andrich en K. H. Härdtl

621.315.592.4

Inleiding

Gedurende de laatste 20 jaren is de verbinding $BaTiO_3$ het onderwerp van menige publikatie geweest. Verreweg het grootste gedeelte van dit werk was gewijd aan de diëlektrische eigenschappen van $BaTiO_3$, b.v. aan de ferro-elektrische eigenschappen. Daar bij dielektrisch onderzoek een eventueel optredend elektrisch geleidingsvermogen storend werkt, werd bij dit onderzoek de weerstand zo groot mogelijk gehouden.

Het blijkt nu dat men de specifieke weerstand van $BaTiO_3$ door dotering met o.a. La, Nb en Sb kan reduceren tot 10 Ωcm. Onderzoekingen aan deze halfgeleidende $BaTiO_3$-monsters hebben tot hoogst merkwaardige resultaten geleid, ook wat betreft hun eigenschappen als halfgeleider. *Fig. 1* toont het verloop met de temperatuur van de specifieke weerstand van $BaTiO_3$ alsmede van $(Ba,Sr)TiO_3$- en $(Ba,Pb)TiO_3$-meng-

Dipl.-Phys. E. Andrich en dr. K. H. Härdtl zijn medewerkers van het laboratorium Hamburg van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

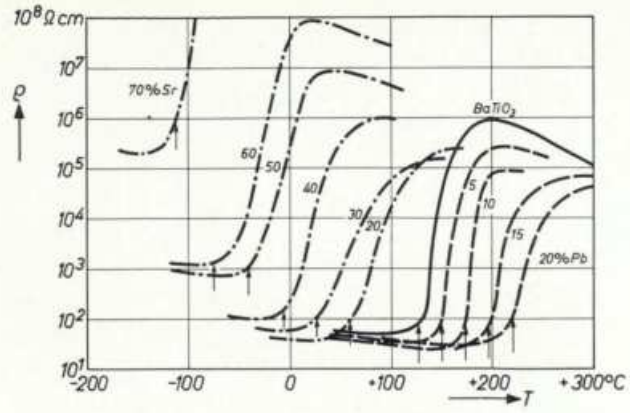


Fig. 1. Het verloop met de temperatuur van de soortelijke weerstand van halfgeleidend $BaTiO_3$ en van $(Ba,Sr)TiO_3$- resp. $(Ba,Pb)TiO_3$-mengkristallen. Al naar gelang van de samenstelling, ligt het Curie-punt T_C (zie de pijltjes) tussen −100 °C en +220 °C.

kristallen. Wat hier direct opvalt, is een steile en aanzienlijke toeneming van de weerstand in de buurt van het ferro-elektrische Curie-punt T_C. Het samenvallen van het Curie-punt met de temperatuur waarbij de weerstand begint te stijgen, wijst op het bestaan van een verband tussen de halfgeleider-eigenschappen en de diëlektrische eigenschappen. Onderzoekingen betreffende de aard van dit verband zijn van het grootste belang. Voorts liggen, wegens de hoge positieve temperatuurcoëfficiënt van de weerstand (maximaal 60% per °C), een gehele reeks van toepassingen van de $BaTiO_3$-halfgeleider als schakelingselement voor de hand. Een bijzonder gunstige omstandigheid hierbij is het feit dat het temperatuurgebied waarin de hoogste waarden van de temperatuurcoëfficiënt voorkomen, verschoven kan worden van −90 °C tot +400 °C door de samenstelling van de mengkristallen te wijzigen [1,2].

In hetgeen volgt, zullen wij ons bezighouden met de fysische oorzaken van de weerstandsverandering en met de toepassingen van het halfgeleidende $BaTiO_3$ als schakelingselement.

Natuurkundig onderzoek

Zoals uit fig. 1 blijkt, neemt de elektrische weerstand van halfgeleidend $BaTiO_3$ binnen een betrekkelijk klein temperatuurgebied nabij het Curie-punt met een aantal ordes van grootte toe [3,4]. Een eerste aanwijzing omtrent de oorzaak van dit ongebruikelijke gedrag van de weerstand vindt men in het feit dat het alleen optreedt bij keramisch materiaal. Onderzoekt men halfgeleidende $BaTiO_3$-kristallen, dan wordt geen weerstandsverhoging geconstateerd [5]. Dit wekt al direct het vermoeden dat de weerstandsverhoging veroorzaakt wordt door de in de polykristallijne keramiek aanwezige korrelgrenzen, die gebieden van hoge weerstand vormen en, althans boven T_C, de totale weerstand van de in serie staande korrelvolumina en korrelgrenzen bepalen.

Fig. 2 toont een ééndimensioneel model van zulk een polykristallijne geleider met een reeks korrels K, die aan

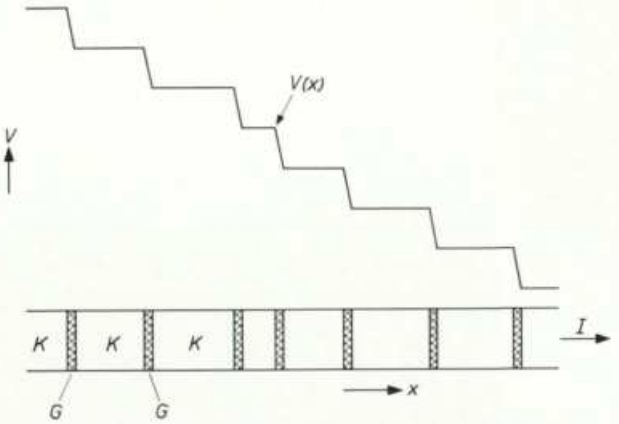


Fig. 2. Eéndimensioneel model van een polykristallijne geleider bestaande uit korrels K en slecht geleidende randlagen G aan de korrelgrenzen. Vloeit er een stroom I door de geleider, dan heeft de daling van de potentiaal $V(x)$ een trapvormig verloop.

de korrelgrenzen G van elkaar gescheiden zijn door wandlagen van geringe dikte doch met zeer hoge elektrische weerstand. Een direct bewijs voor het bestaan van deze slecht geleidende grenslagen kan men met de gebruikelijke methodes van weerstandsmeting niet leveren; de korrels zijn daarvoor te klein. Wèl blijkt het uit het volgende experiment [6].

Wanneer door een reeks korrels (zoals in het model van fig. 2) een stroom I vloeit, dan zal de potentiaal $V(x)$, wegens het grote verschil in soortelijke weerstand tussen de korrelgrenzen en de korrelinhouden, een trapsgewijze daling vertonen. De korrelgrenzen zijn derhalve gebieden van relatief hoge veldsterkte. Dit sterke elektrische veld breidt zich, daar waar de korrelgrenzen aan het oppervlak van het materiaal komen, in de ruimte uit op een wijze die men voor een ééndimensioneel model vindt afgebeeld in *fig. 3*. Diëlektrische deeltjes onder-

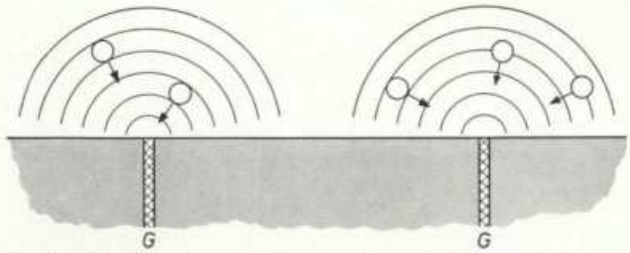


Fig. 3. Principe van het zichtbaar maken („decoreren") van korrelgrenzen G door middel van een suspensie van diëlektrische deeltjes die de invloed ondergaan van het bij de korrelgrenzen uittredende elektrische veld.

[1] O. Saburi, J. Amer. Cer. Soc. **44**, 54, 1961.
[2] B. Frank, niet gepubliceerd.
[3] P. W. Haaijman, R. W. Dam en H. A. Klasens, Deutsches Bundespatent Nr. 929350, 1955.
[4] O. Saburi, J. Phys. Soc. Japan **14**, 1159, 1959.
[5] G. Goodman, J. Amer. Cer. Soc. **46**, 48, 1963.
[6] P. Gerthsen en K. H. Härdtl, Z. Naturf. **18a**, 423, 1963.
[7] Een samenvattend overzicht met literatuurverwijzingen vindt men in J. Volger, Progress in Semiconductors, **4**, 207, 1960 (Heywood, London).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vinden door dit sterk inhomogene strooiveld een kracht in de richting van de korrelgrens. Brengt men dus een suspensie van diëlektrische deeltjes in een niet-geleidende vloeistof aan op het oppervlak van een polykristallijne geleider waarin een stroom vloeit, dan hebben deze deeltjes de neiging zich op te hopen nabij de korrelgrenzen, daar hun diëlektrische constante groot is in vergelijking met die van de vloeistof. Dit moet met een microscoop te zien zijn.

Fig. 4a is een microfoto van een slijpplaatje van keramisch, halfgeleidend $BaTiO_3$. De korrelgrenzen zijn duidelijk te zien. Fig. 4*b* toont hetzelfde oppervlak maar nu bedekt met een suspensie van TiO_2-poeder in silikoonolie, terwijl een elektrisch veld is aangelegd in de richting van de pijl. De opeenhoping van de deeltjes nabij de korrelgrenzen is duidelijk zichtbaar. Dit

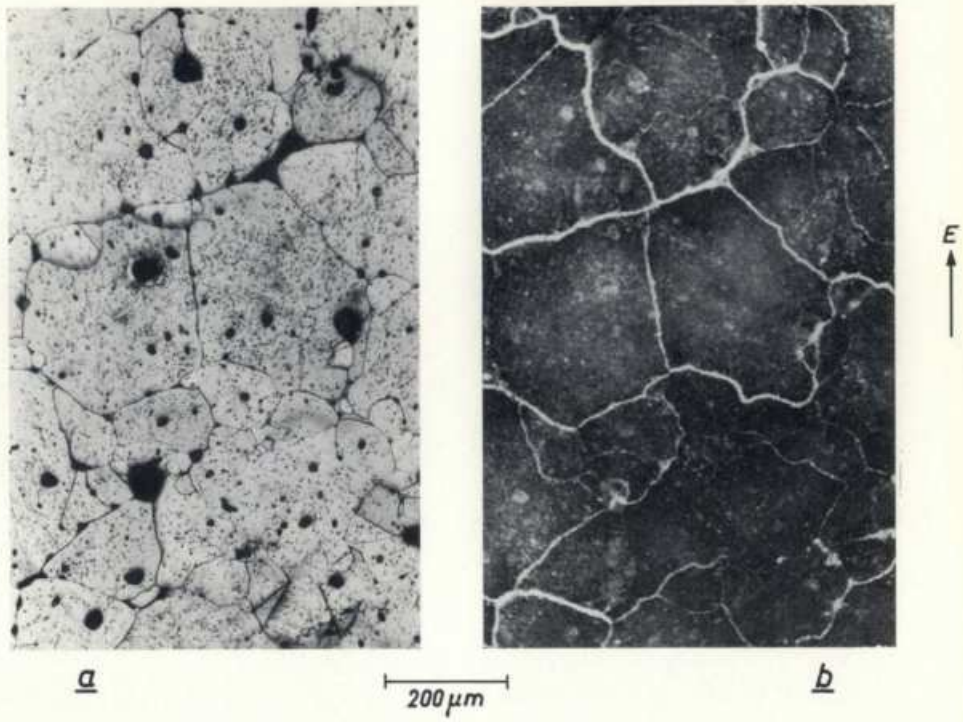


Fig. 4. *a*) Microfoto van een slijpplaatje van polykristallijn $BaTiO_3$, *b*) hetzelfde oppervlak na het opbrengen van een suspensie van TiO_2-deeltjes in silikoonolie en het aanleggen van een elektrisch veld E in de pijlrichting. De potentiaaldaling per korrelgrens bedraagt ca. 1 V, de temperatuur 170 °C.

experiment bevestigt het optreden van een hogere korrelgrensweerstand bij temperaturen boven T_C. Dit geeft aanleiding tot een niet-homogene weerstand, hetgeen in de volgende verschijnselen tot uiting komt:

1) De weerstand hangt af van de frequentie. In *fig. 5* is het reële deel van de weerstand uitgezet tegen de temperatuur, met de frequentie als parameter. Het feit dat de weerstand bij hoge frequentie lager is, kan plausibel gemaakt worden aan de hand van *fig. 6* waarin men het vervangingsschema vindt afgebeeld van de serieschakeling van een korrel en een korrelgrens [7]. Bij de frequentie nul is de totale weerstand gelijk aan de som van de weerstand R_G van de korrelgrens en van de weerstand R_K van de korrelinhoud. Naarmate de frequentie hoger wordt, wordt de hoge weerstand R_G meer en meer kortgesloten door de capaciteit C_G van

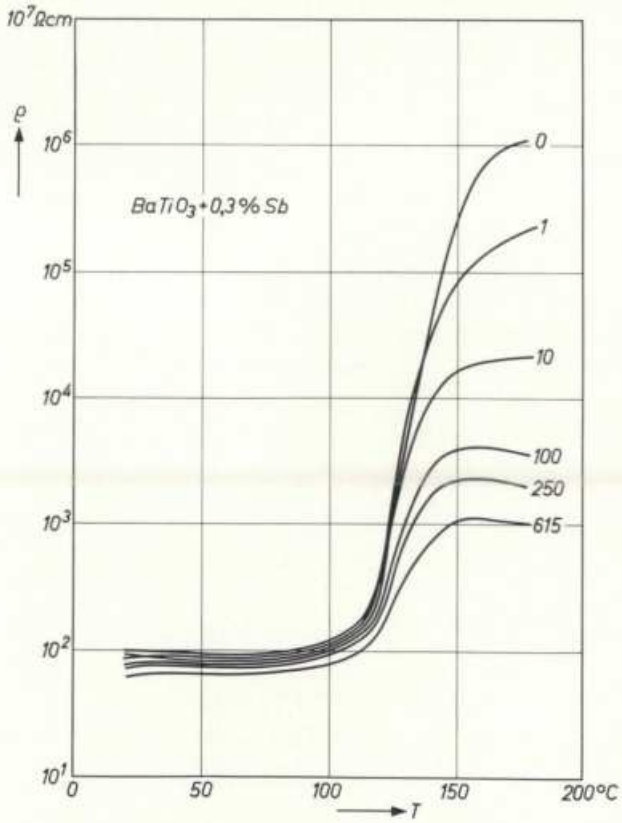


Fig. 5. Het rëele deel van de weerstand van $BaTiO_3$ + 0,3 % Sb als functie van de temperatuur T bij verschillende frequenties (in kHz).

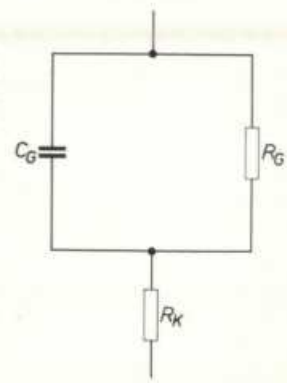


Fig. 6. Vervangingsschema voor korrel en korrelgrens. R_G = zuivere weerstand van de korrelgrens. C_G = capaciteit van de korrelgrens, R_K = zuivere weerstand van het korrellichaam.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

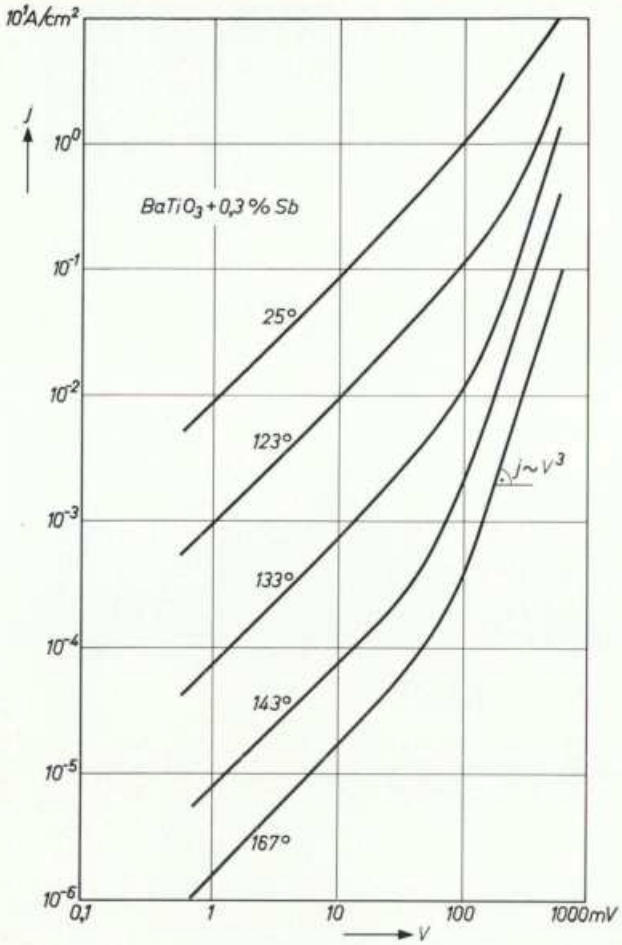


Fig. 7. Stroom-spanningskromme van $BaTiO_3$ + 0,3 % Sb. De stroomdichtheid j is uitgezet tegen V, de potentiaaldaling per korrelgrens.

de korrelgrens, zodat bij hoge frequentie de totale weerstand die van de korrelinhoud R_K begint te benaderen.

2) De stroom-spanningskarakteristiek is niet-lineair. *Fig. 7* toont de stroomdichtheid j als functie van de potentiaaldaling per korrelgrens V bij verschillende temperaturen. Bij grote vermogens werd de temperatuur constant gehouden door te meten met behulp van impulsen. Bij lage spanning zijn de karakteristieken lineair. Bij hoge spanning vindt men echter, dat j toeneemt met V^3, op overeenkomstige wijze als de karakteristieken van varistors (van de spanning afhankelijke weerstanden) van SiC. Dergelijke afwijkingen van de wet van Ohm zijn kenmerkend voor niet-homogene weerstanden.

Rest nog de vraag naar de oorzaak van de hoge weerstand van de korrelgrenzen. Volgens Heywang [8] moet deze worden toegeschreven aan de aanwezigheid van grenslagen met verminderde ladingdragersconcentratie (zie *fig. 8*). Deze ontstaan doordat aan de korrelgrens elektronen uit de geleidingsband overgaan naar elektronische oppervlakniveaus S. Daardoor ontstaat een zone ter dikte $2L$, waaraan de ladingdragers ontrokken zijn en die dus slecht geleidt. In deze zone blijven als positieve ruimtelading de niet langer gecompenseerde, positief geladen, donors (dichtheid n_D) over. Met deze ruimtelading correspondeert een potentiaalheuvel die aan de korrelgrens zijn hoogste punt bereikt; de maximumhoogte φ_0 wordt gegeven door:

$$\varphi_0 = \frac{e\, n_D\, L^2}{2\, \varepsilon\, \varepsilon_0}. \qquad \ldots\ldots\ (1)$$

Bij stroomdoorgang kunnen de elektronen deze potentiaalheuvel slechts overwinnen door thermische excitatie. Als gevolg hiervan geldt voor de soortelijke weerstand:

$$\varrho \sim \exp(\varphi_0/kT). \qquad \ldots\ldots\ (2)$$

De weerstand hangt dus sterk af van de hoogte van de potentiaalheuvel.

Ter verklaring van het in fig. 1 getoonde verloop van de weerstand met de temperatuur is het noodzakelijk de bovenbeschreven eigenschappen van $BaTiO_3$ als halfgeleider, te correleren met de bekende diëlektrische eigenschappen. Dit geschiedt met behulp van betrekking (1), die beschrijft hoe de hoogte φ_0 van de potentiaalbarrière — die doorslaggevend is voor de weerstand — afhangt van de diëlektrische constante ε [8]. Daar de diëlektrische constante van $BaTiO_3$ boven T_C de wet $\varepsilon = K/(T - T_C)$ volgt (de wet van Curie-Weiss) en dus met toenemende T sterk daalt, zal φ_0/kT met toenemende temperatuur stijgen, en de weerstand volgens betrekking (2) eveneens. Bij een verdere verhoging van de temperatuur zal in elk geval het aantal elektronen in de oppervlakniveaus S door thermische ionisatie afnemen, hetgeen leidt tot een verlaging van φ_0 en derhalve tevens tot een vermindering van de weerstand. Met dit model kan men het verloop van de weerstand met de temperatuur, althans kwalitatief, bevredigend beschrijven [8].

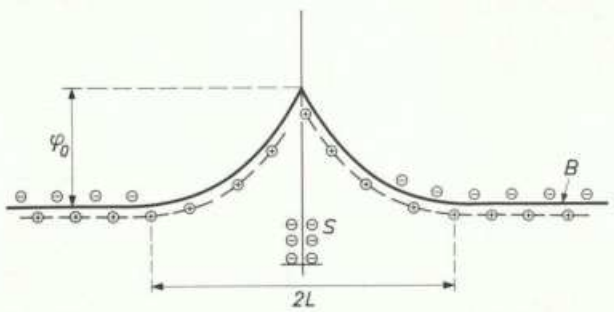


Fig. 8. Schematische voorstelling van het potentiaalverloop aan de korrelgrens van $BaTiO_3$. B = onderkant van de geleidingsband, S = oppervlakniveaus.

[8] W. Heywang, Solid State Electronics **3**, 51, 1961.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Karakteristieken en technische toepassingen

Voor de halfgeleidende titanaten hebben verschillende benamingen burgerrecht verkregen. In Duitsland spreekt men dikwijls van „Kaltleiter", een naam die ongetwijfeld de functie duidelijk weergeeft. We willen hier echter een van de nederlandse benamingen PTC-weerstand (weerstand met positieve temperatuurcoëfficiënt) of, liever, PTC-thermistor gebruiken. De belangrijkste eigenschappen van deze thermistors worden beschreven door de volgende karakteristieken:

a) de temperatuurkarakteristiek van de weerstand, de *R-T*-karakteristiek (fig. 1),
b) de stroom-spanningskarakteristiek, en
c) de stroom-tijdkarakteristiek.

In het volgende zullen wij in het bijzonder de beide laatste karakteristieken beschouwen.

Een belangrijke karakteristieke grootheid is voorts die welke de warmteafvoer naar de omgeving beschrijft. Deze hangt af van de geometrie, van de toevoerdraden en van het warmtegeleidingsvermogen van het materiaal. Binnen het temperatuurgebied waarin deze thermistors werken, mag men deze grootheid als constant beschouwen (de zg. verliesconstante). Ze geeft aan welk elektrisch vermogen noodzakelijk is om de temperatuur in de halfgeleider in stilstaande lucht constant te houden op 1 °C boven de omgevingstemperatuur. Bij de gebruikelijke uitvoeringen van de onderhavige thermistors bedraagt deze verliesconstante D ongeveer 10 tot 20 mW/°C.

De statische stroom-spanningskarakteristiek

Bij elektrische belasting stijgt de temperatuur van een PTC-thermistor doordat er warmte ontwikkeld wordt. Voor praktisch gebruik doet men er daarom goed aan de statische stroom-spanningskarakteristiek vast te leggen; deze verkrijgt men door de meetwaarden steeds pas op te nemen nadat de eindtemperatuur bereikt is. Halfgeleidend $BaTiO_3$ met een Curie-temperatuur van 120 °C is uiterst geschikt voor schakeldoeleinden. Een geïdealiseerde karakteristiek van deze halfgeleider, waarbij wordt verondersteld dat de weerstand tussen 20 °C en 120 °C onafhankelijk is van de temperatuur maar boven 120 °C in een zeer klein temperatuurinterval een aantal ordes van grootte toeneemt, zou, omgezet in een statische stroom-spanningskarakteristiek, de kromme van *fig. 9* opleveren.

Conform de wet van Ohm is de curve in het begin recht. Dit gaat door totdat het vermogen bereikt is waarbij de temperatuur van de weerstand 120 °C is. (De grootte van dit vermogen hangt uiteraard af van de omgevingstemperatuur T_u.) Bij deze temperatuur wordt de maximumstroom

$$I_{max} = D(120 - T_u)/V \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

bereikt, en bij verdere verhoging van de spanning gaat de karakteristiek over in de hyperbool:

$$VI = D(120 - T_u) = \text{constant} \quad . \; . \; . \quad (4)$$

Verhoogt men namelijk in dit gebied de aangelegde spanning, dan wordt een verdere verhoging van het opgenomen vermogen, en dus ook van de temperatuur, tegengewerkt doordat de weerstand van de transistor sterk toeneemt.

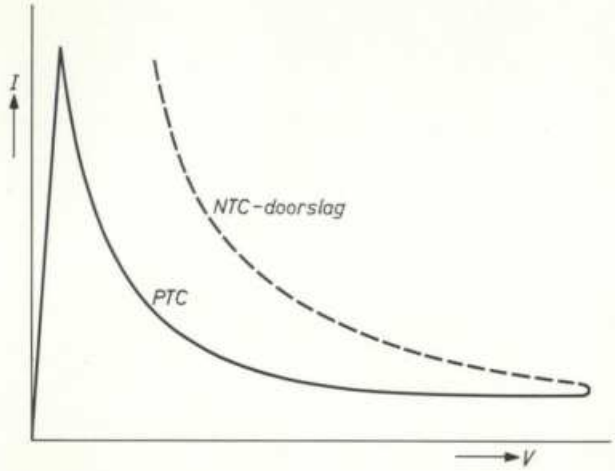


Fig. 9. Stroom-spanningskarakteristiek van een PTC-thermistor (PTC-weerstand) van $BaTiO_3$.

Daar het toenemen van de weerstand in werkelijkheid niet precies bij 120 °C optreedt, doch zich afspeelt tussen 110 en 180 °C, wijkt de dalende karakteristiek van de zuivere hyperboolvorm af. Op het einde van de stroom-spanningskarakteristiek verkrijgt men een ietwat hoger vermogen $D(180 - T_u)$ dan in de nabijheid van het stroommaximum $D(110 - T_u)$. Uit vgl. (3) en (4) blijkt trouwens reeds dat men voor verschillende omgevingstemperaturen een hele reeks van ongeveer hyperbolische krommen verkrijgt, ieder uitgaande van een punt van het lineaire beginstuk van de karakteristiek (*fig. 10*).

Het gedrag als PTC-thermistor is gebonden aan een bepaald temperatuurgebied. Bij hogere temperatuur verkrijgt de weerstand een *negatieve* temperatuurcoëfficiënt, hetgeen betekent dat bij spanningen boven V_{max} de thermische doorslag begint (zie de streeplijn in fig. 9).

De hoogste spanning die kan worden aangelegd, kan men berekenen wanneer de maximumweerstand R_{max} en het vermogen $D(180 - T_u)$ bekend zijn. Toch mag men bij belasting R_{max} niet langer op de 10 000-voudige waarde van de weerstand bij koude R_{min} stellen, doch dient hiervoor slechts de 100- tot 1000-voudige waarde te nemen. De bestandheid tegen spanning is derhalve niet zo groot als men op grond van de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

R-T-karakteristiek zou mogen verwachten. Dit is aan de hand van het model van de keerlagen tussen de korrels goed te verklaren. Bevinden zich op de weg van de stroom ongeveer 100 korrelgrenzen en staat de keramische halfgeleider onder een spanning van 100 V, dan daalt de spanning per keerlaag met 1 volt. Zo'n keerlaag is waarschijnlijk minder dan 1 μm dik. Er heerst ter plaatse dus een veldsterkte, die de doorslagveldsterkte van niet-geleidend $BaTiO_3$ benadert. Derhalve mag men niet rekenen met de weerstandswaarden die men met lage meetspanningen verkregen heeft. Uit dit model kan men tevens concluderen dat fijnkorrelige keramische $BaTiO_3$-halfgeleiders beter bestand zijn tegen spanning dan grofkorrelige. Men kan thans reeds PTC-thermistors uit $BaTiO_3$ vervaardigen die in koude toestand een soortelijke weerstand van 100 Ωcm bezitten en bestand zijn tegen 600 volt per cm. De ervaring leert dat men voor de maximaal aan te leggen spanning met de volgende betrekking dient te rekenen:

$$V^2_{max} = 10^2 \, R_{min} \, D(180 - T_u) \quad . \; . \; . \quad (5)$$

Een vervangingsschema dat aan de belangrijkste eigenschappen van de PTC-thermistor beantwoordt,

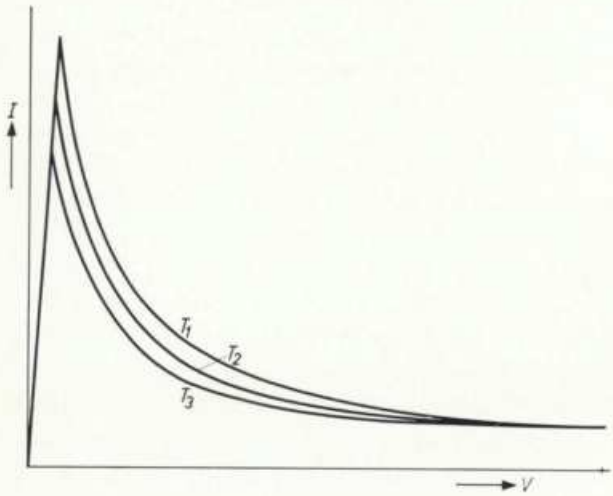


Fig. 10. Het verschuiven van de *V-I*-karakteristiek van een PTC-thermistor bij veranderen van de temperatuur; $T_3 > T_2 > T_1$

bestaat dus uit drie parallel geschakelde elementen: de thermistor volgens zijn *R-T*-karakteristiek, een van de spanning afhankelijke weerstand (varistor) die de bestandheid tegen spanning begrenst, en een condensator (met een capaciteit van ten hoogste enkele nanofarads) die de, bij hoge frequenties belangrijke, capacitieve parallelweg representeert (vgl. fig. 6).

De stroom-tijdkarakteristiek

Daar de vorm van de in fig. 9 getoonde stroom-spanningskarakteristiek uitsluitend wordt bepaald door het temperatuurverloop van de weerstand, verkrijgt men deze karakteristiek alleen wanneer men steeds nadat een spanning is aangelegd, wacht tot zich een stationaire stroomwaarde heeft ingesteld. Dan pas bestaat er evenwicht tussen het in de halfgeleider gedissipeerde vermogen $V^2/R(T)$ en het aan de omgeving afgegeven vermogen $D(T - T_u)$. Hoe groter de beginwaarde van het elektrische vermogen is, des te sneller zal de PTC-thermistor de temperatuur bereiken waarbij de weerstand hoog is. *Fig. 11* toont de stroom-tijdkarak-

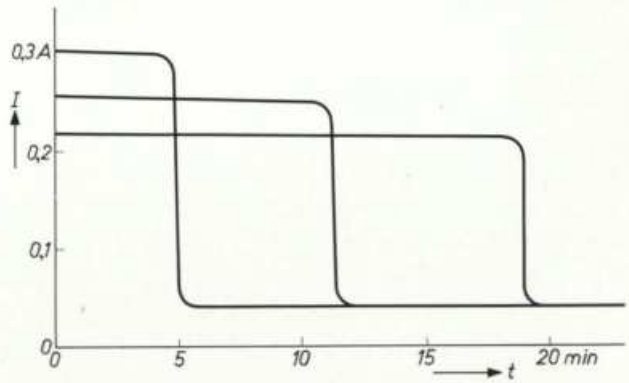


Fig. 11. Stroom-tijdkarakteristiek van een $BaTiO_3$-halfgeleider voor verschillende beginstromen.

teristieken bij verschillende beginstromen; deze waren ingesteld door het voorschakelen van een geschikte serie-weerstand. Soortgelijke karakteristieken verkrijgt men ook bij het laden van een condensator; daarom kan een PTC-thermistor in bepaalde schakelingen bij lage frequentie (lager dan 1 Hz) de plaats innemen van een zeer grote capaciteit. Uiteraard wordt hier de elektrische energie niet opgeslagen doch in de weerstand gedissipeerd. Tevens dient men rekening te houden met de sterke invloed van de omgevingstemperatuur en met het verschil tussen opwarm- en afkoeltijd. De overeenkomst met een condensator blijkt dus uit het dynamische stroom-spanningsverloop bij lage frequenties, en heeft niets te maken met de werkelijk capacitieve kortsluiting van de keerlagen bij hoge frequenties. Soortgelijke beschouwingen gelden voor de NTC-thermistor, die bij lage frequenties met een zelfinductie vergeleken kan worden, omdat de kromme hiervan een verloop heeft, tegengesteld aan dat voor de PTC-thermistor. Een combinatie van deze twee thermistors levert schakelingen met hoogst belangwekkende eigenschappen op.

Toepassingen gebaseerd op de temperatuurkarakteristiek van de weerstand

In veel gevallen waarin NTC-thermistors als temperatuuropnemer worden toegepast, kan men ook PTC-thermistors gebruiken. Nieuwe toepassingen zijn echter voornamelijk daar te verwachten waar de bijzondere eigenschappen van de PTC-thermistor in het geding komen. Dat zijn b.v.:

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

a) De positieve temperatuurcoëfficiënt van de weerstand. Deze kan van belang zijn in schakelingen die ook bij het uitvallen van de temperatuuropnemer — b.v. door breuk van een contact ($R = \infty$) — dienen te schakelen („fail safe circuits").
b) De grote steilheid van de *R-T*-kromme. Deze maakt het mogelijk hetzij nauwkeuriger te meten, hetzij te werken met een geringere versterking.
c) Een temperatuurgebied (bij $BaTiO_3$ van 20 tot 100 °C), waarin de weerstand nagenoeg niet door de temperatuur beïnvloed wordt. Dit kan van belang zijn bij het besturen van een relais dat op kleine fluctuaties van de omgevingstemperatuur niet mag reageren, maar dat wèl moet schakelen bij overschrijding van een bepaalde temperatuur. De halfgeleidende titanaten met hun sprongsgewijze weerstandsverandering in de nabijheid van het Curie-punt kunnen aan een dergelijke eis voldoen.

Toepassingen gebaseerd op de stroom-spanningskarakteristiek

In *fig. 12* zijn getekend de stroom-spanningskarakteristiek van een PTC-thermistor en de rechte, voor $V = V_a$ geldende, werklijn van een daarmee in serie geschakeld apparaat dat de wet van Ohm volgt (de „verbruiker"). Door het niet-lineair zijn van de karakteristiek zijn er drie snijpunten mogelijk, waarvan P_1 en P_2 stabiele werkpunten vertegenwoordigen, terwijl daarentegen P_3 een onstabiele toestand representeert. Het snijpunt P_3 is van belang voor het opwekken van oscillaties. De genoemde onstabiliteit blijkt uit *fig. 13*.

Was de weerstand die de thermistor in P_3 heeft, die van een schakelingselement dat de wet van Ohm volgt, dan was de karakteristiek daarvan een rechte door P_3 en O. Bij fluctuaties van de spanning of van de warmteafvoer kan de weerstand van de thermistor tijdelijk een andere waarde aannemen, b.v. corresponderend met het punt x van de karakteristiek. Dit leidt dan tot het snijpunt P_x, waarbij de spanningsverdeling zodanig is dat de thermistor de met y corresponderende spanning moet aannemen, enz. Men bemerkt dus dat in geval van een kleine afwijking van P_3, het werkpunt zich in de richting van P_1 of P_2 verplaatst.

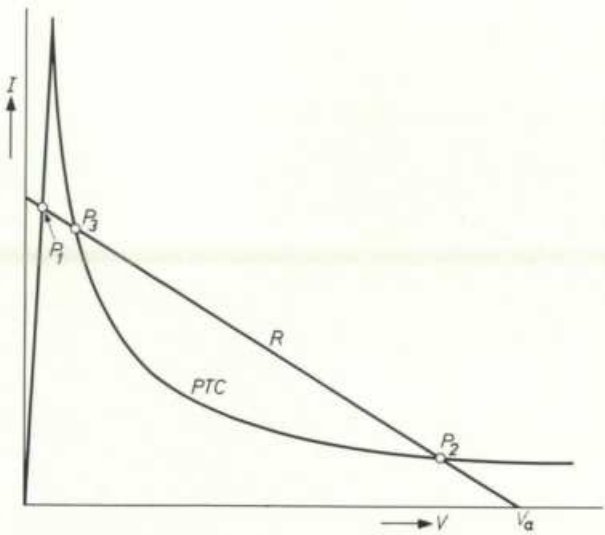


Fig. 12. De werkpunten P_1, P_2, P_3 van een PTC-thermistor die in serie is geschakeld met een apparaat dat de wet van Ohm volgt.

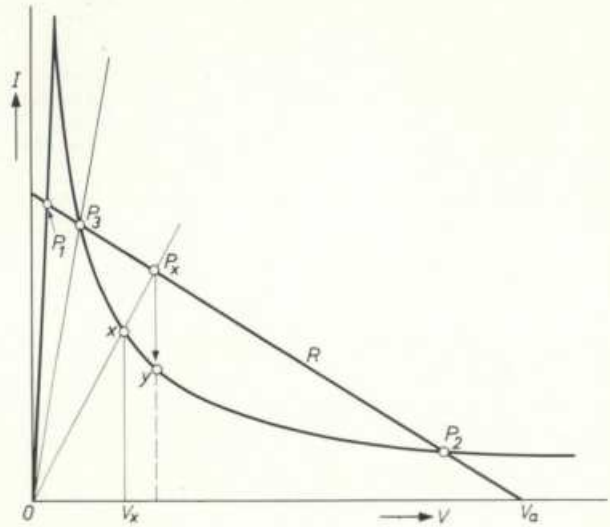


Fig. 13. Ter verklaring van de onstabiliteit van punt P_3 van de karakteristiek van fig. 12.

Wanneer men een spanning V_a op zulk een serieschakeling aansluit, dan zal zich aanvankelijk het werkpunt P_1 instellen. Er bestaan nu drie mogelijkheden om het werkpunt te verplaatsen naar P_2, het punt dat correspondeert met de hoge weerstand van de thermistor:
1) V_a verhogen (*fig. 14a*),
2) de omgevingstemperatuur verhogen (fig. 14*b*)
3) de weerstand van de verbruiker verminderen (fig. 14*c*).
Als voorbeeld bij fig. 14*a* noemen wij: miniatuur-elektromotoren die zowel op 110 als op 220 V moeten kunnen werken, worden dikwijls alleen ontworpen voor 110 V en voor aansluiting op 220 V beveiligd door een serieweerstand die de halve spanning opneemt. In dat geval kan een, parallel met de serieweerstand geschakelde, PTC-thermistor zorgdragen voor een automatische aanpassing aan de beschikbare netspanning. Deze thermistor moet zó gekozen worden dat hij bij 110 V in het punt P_1 werkt — dus een lage weerstand heeft —, maar bij 220 V in het punt P_2; de weerstand is dan zo hoog dat de thermistor de serieweerstand van de motor niet meer kortsluit.

Een voorbeeld bij fig. 14*b*: een kleine elektromotor, ingebouwd in een klein, gesloten motorhuis, kan bij hoge belasting op den duur te warm worden door onvoldoende warmteafvoer. Een PTC-thermistor in serie

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

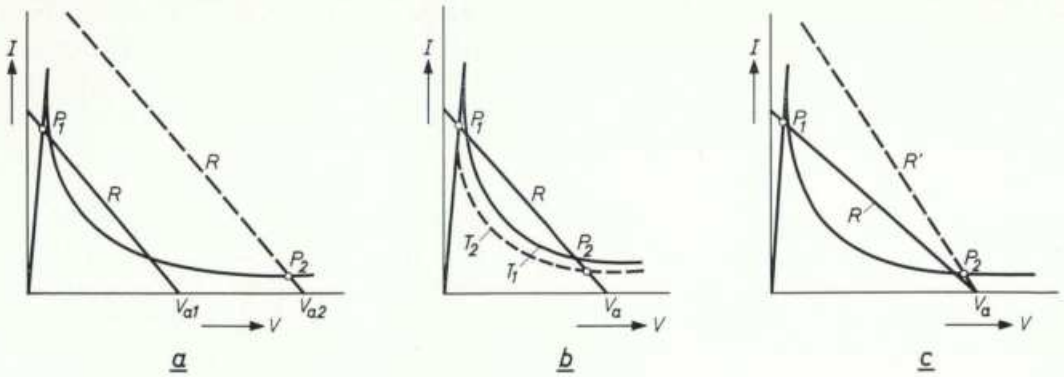


Fig. 14. Bij een serieschakeling van een PTC-thermistor en een apparaat dat de wet van Ohm volgt (de „verbruiker") kan overgang van werkpunt P_1 naar P_2 bewerkstelligd worden door: *a*) de spanning te verhogen, *b*) de temperatuur te verhogen ($T_2 > T_1$), en *c*) de weerstand van de verbruiker te verlagen.

met de motor en in thermisch contact ermee kan oververhitting voorkomen. Door het thermische contact wordt de warmteafvoer van de thermistor geringer naarmate de motor warmer wordt; de *V-I*-kromme verplaatst zich dus (zie de streeplijn in fig. 14*b*) en er is op den duur alleen nog een stabiel werkpunt in het deel van de karakteristiek waar de weerstand hoog is. De stroom bedraagt dan nog slechts een tiende van de oorspronkelijke waarde, terwijl bovendien vrijwel de gehele aangelegde spanning door de thermistor wordt opgenomen.

Een voorbeeld bij fig. 14*c*: bepaalde schakelingselementen veranderen terwijl ze in werking zijn van weerstand, zoals b.v. een elektronenbuis, of een elektromotor waarvan de impedantie bij rembelasting kleiner wordt. Dit kan aanleiding geven tot storingen door overbelasting. Een goed gekozen PTC-thermistor in serie met de motor zal dan door de te sterke stroom eveneens verwarmd worden en reduceert in het werkpunt P_2 het door de stroomverbruiker opgenomen vermogen tot minder dan 1% van de oorspronkelijke waarde.

Bij automatische regeling van de roostervoorspanning kan een PTC-thermistor in de katodeketen van een elektronenbuis dienen als betrouwbare beveiliging tegen overbelasting. Daar de thermistor bij te sterke stroom een hogere weerstand krijgt, veroorzaakt hij een overeenkomstig grotere potentiaaldaling, waardoor de katode in potentiaal stijgt en de buis niet langer geleidt. Dikwijls kan men zelfs de overbruggingscondensator geheel weglaten, aangezien er reeds sprake is van een capacitieve overbrugging door de keerlagen in de halfgeleider.

Het gedrag tijdens belasting van twee thermistors in serie, kan men gemakkelijk uit een grafiek afleiden. In *fig. 15* vindt men zo'n grafiek voor twee PTC-thermistors. Er zijn wederom drie werkpunten, waarvan ook hier het middelste — analoog met het geval van fig. 13 — onstabiel is. Van de beide thermistors bereikt er dus slechts één een temperatuur waarbij de weerstand hoog wordt. Wegens de geringe stroom kan de andere weerstand onmogelijk warm worden. Eerstgenoemde thermistor neemt tevens nagenoeg de gehele spanning op. Hieruit blijkt dus dat het geen zin heeft voor hoge spanningen met meer dan twee PTC-thermistors in serie te werken; ze zouden achtereenvolgens stuk gaan. Men dient te allen tijde zorg te dragen voor een gelijkmatige spanningsverdeling met behulp van een parallel geschakelde reeks stabilisators (varistors).

In geval van *belasting* echter is ook de *parallel*schakeling van PTC-thermistors mogelijk. Deze worden dan uniform verwarmd en in de grafiek kunnen voor elke waarde van de spanning de stromen bij elkaar worden opgeteld.

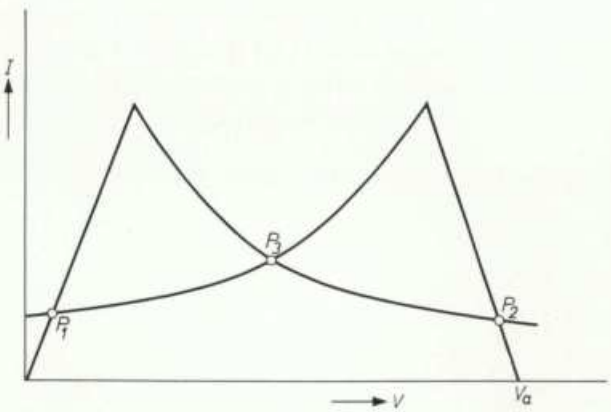


Fig. 15. Ter illustratie van het gedrag van twee in serie geschakelde PTC-thermistors.

Van het zojuist beschreven gedrag kan men gebruik maken om relaxatietrillingen van zeer lage frequentie op te wekken (*fig. 16*). In deze brugschakeling zijn de weerstandswaarden van de NTC-thermistors zo hoog gekozen, dat deze bij de spanning $V_a/2$ niet heet kunnen worden. Daar in de andere tak echter steeds slechts één PTC-thermistor een hoge weerstand kan krijgen, staat vrijwel de gehele spanning V_a over deze thermistor, en

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

derhalve ook over de daarmee parallel staande NTC-thermistor. De spanning kan groot genoeg zijn om de NTC-thermistor te verwarmen tot het punt van thermische doorslag. De hete PTC-thermistor wordt hierdoor overbrugd en de aanzienlijk sterkere stroom die nu vloeit, begint de koude PTC-thermistor te verwarmen, enz. Deze schakeling vormt dus een oscillerende wipschakeling (multivibrator) met een frequentie lager dan 0,1 Hz.

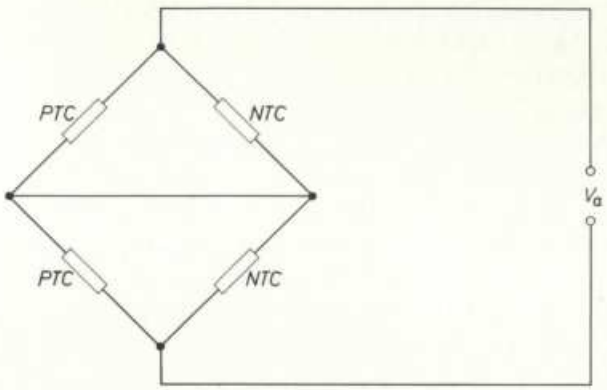


Fig. 16. Brugschakeling van twee PTC- en twee NTC-thermistors (resp. aangeduid met PTC en NTC), die als oscillerende wipschakeling (multivibrator) werkt.

Ook kan men een oscillator verkrijgen door een PTC-thermistor van lage en een NTC-thermistor van hoge weerstand in serie te schakelen. In *fig. 17* ziet men dat de beide dalende karakteristieken een snijpunt hebben. Wanneer dit punt bereikt is, kan het bij bepaalde waarden van V_a onstabiel zijn; het komt dan overeen met het punt P_3 van fig. 12 en 13. Een ander werkpunt is er echter niet, zodat het systeem om het genoemde snijpunt zal gaan slingeren. Bij de zeer lage frequenties (onder 1 Hz) waarmede dit systeem oscilleert, kan men met recht de PTC-thermistor vergelijken met een capaciteit en de NTC-thermistor met een zelfinductie. De rol van generator wordt dan vervuld door de negatieve weerstand van een der beide schakelingselementen.

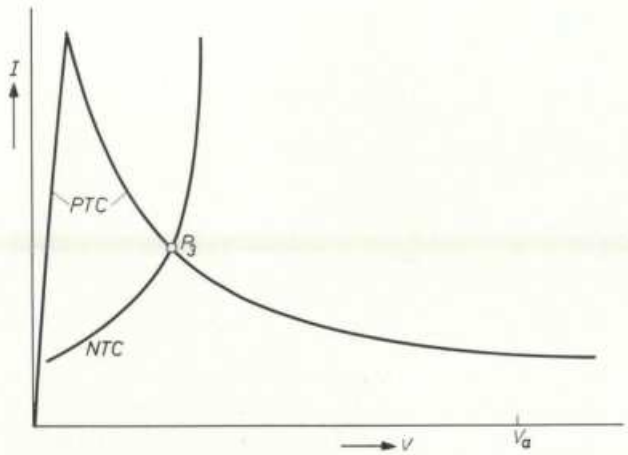


Fig. 17. Een serieschakeling van een PTC- en een NTC-thermistor levert oscillaties met frequenties onder 1 Hz, daar enerzijds het werkpunt P_3 onstabiel is, terwijl er anderzijds geen ander werkpunt mogelijk is.

Voorbeeld van toepassing van de stroom-tijdkarakteristiek

Op overeenkomstige wijze als men met NTC-thermistors een inschakelvertraging kan realiseren, kan men met PTC-thermistors een vertraagd uitschakelen bewerkstelligen. Met snel draaiende elektromotoren in huishoudelijke apparaten is het vaak het geval dat ze, ter bescherming van de wikkeling, slechts enkele minuten continu mogen draaien. Een geschikte PTC-thermistor in serie met het apparaat schakelt de motor na verloop van de voorgeschreven tijd automatisch uit (werkpunt P_2, fig. 12). Bij grotere rembelasting wordt deze weerstand sneller warm, evenals de motorwikkeling. De schakeltijd van de thermistor hangt vanzelfsprekend ook af van de omgevingstemperatuur, en wel op dezelfde wijze als de verwarming van de wikkeling. In dit opzicht kan het effect van deze afhankelijkheid dus alleen maar gunstig genoemd worden.

Direct schakelen door middel van PTC-thermistors heeft over het algemeen slechts zin voor stroomverbruikers die een vermogen van minder dan 100 W opnemen. Bij hogere vermogens is een relais gunstiger. Men moet overigens niet vergeten dat slechts het overschakelen van werkpunt P_1 naar P_2 (fig. 12) met voldoende gevoeligheid geschiedt. Terugschakelen naar P_1 daarentegen levert moeilijkheden op. Hiertoe mag de rechte karakteristiek van de stroomverbruiker slechts één enkel snijpunt met de karakteristiek van de thermistor hebben, welk snijpunt bovendien in het lineaire beginstuk van de karakteristiek gelegen moet zijn. Dit is alleen mogelijk bij lage V_a (vgl. fig. 14*a*), bij tamelijk lage temperatuur (vgl. fig. 14*b*), of wanneer de weerstand van de stroomverbruiker zeer hoog is (vgl. fig. 14*c*).

Samenvatting. Bariumtitanaat-keramiek was tot nu toe voornamelijk bekend wegens zijn diëlektrische eigenschappen, en hierop berustte dan ook de toepassing van dit materiaal in de techniek. Door een juiste dotering kan men echter halfgeleidend $BaTiO_3$ vervaardigen dat in polykristallijne keramische vorm een niet-lineaire weerstand-temperatuurkromme bezit die boven het ferro-elektrische Curie-punt zeer sterk oploopt. De plaats van het ferro-elektrische Curie-punt kan, door de samenstelling der mengkristallen te wijzigen, overal gekozen worden tussen −90 °C en +400 °C. De sterke toeneming van de weerstand kan men, met behulp van het energiebandenmodel, verklaren uit de aanwezigheid van slecht geleidende korrelgrenzen in de polykristallijne keramiek. PTC-thermistors (weerstanden met positieve temperatuurcoëfficiënt) vervaardigd uit halfgeleidende $BaTiO_3$-keramiek, zijn voor allerlei toepassingen van belang, o.a. als beveiliging tegen overbelasting, voor de automatische begrenzing van de draaitijd van kleine elektromotoren, of voor het met eenvoudige middelen opwekken van uiterst langzame oscillaties.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Onderzoekingen aan het grensvlak van germanium en water

H. U. Harten, R. Memming en G. Schwandt

541.183:546.289

Wel bijzonder goed dient men de eigenschappen te kennen van het materiaal waaruit een kristal bestaat, om met enige kans van slagen te trachten ook de eigenschappen van het oppervlak van het kristal te leren kennen. Dergelijk onderzoek is hierom zo moeilijk, omdat „oppervlakverschijnselen" in zulk een sterke mate beïnvloed worden door zelfs de kleinste hoeveelheden geadsorbeerde materialen — door waterdamp, door zuurstof, door het vet van onze vingers, kortom door iedere denkbare soort verontreiniging.

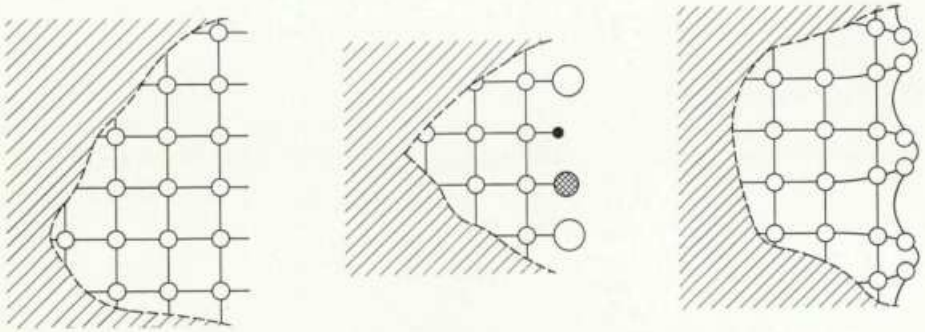
De beste monokristallen weet men tot nu toe te vervaardigen van germanium of van silicium. Deze beide halfgeleiders komen derhalve het meest voor een onderzoek van oppervlakken in aanmerking [1]. Daar komt bij dat een dergelijk onderzoek behalve voor de wetenschap ook voor de techniek van belang is: de geleidelijke achteruitgang in eigenschappen die men wel bij transistors waarneemt, is het gevolg van processen die zich afspelen aan het oppervlak van het „actieve" transistorgedeelte.

Als een fysicus een bepaald effect wil onderzoeken, zal hij trachten het onderzoek zo in te richten dat alle mogelijke storende invloeden kunnen worden uitgesloten. Men heeft zich dan ook allereerst met de vraag beziggehouden hoe zo zuiver mogelijke oppervlakken te verkrijgen; pogingen in die richting zijn gedaan door kristallen in een uiterst hoog vacuüm te splijten. Op deze wijze hoopte men oppervlakken te verkrijgen zoals schematisch zijn weergegeven in *fig. 1a*: de atomen van het buitenste roostervlak hebben aan één zijde geen buren meer, en hun vrije valenties strekken zich in de lege ruimte uit. Bevinden zich daar vreemde atomen, dan zullen deze geadsorbeerd worden (fig. 1*b*); echter ook als ze ontbreken, blijven de vrije valenties in het algemeen niet vrij, doch ontstaat er een verzadiging van de valenties door onderlinge binding. Maar hiervoor „passen" de valentierichtingen weer niet, en het gevolg zal zijn dat het kristalrooster aan het grensvlak een sterke vervorming ondergaat (fig. 1*c*). De „zuivere" oppervlakken blijken dus helemaal niet zo vrij van storende invloeden te zijn als men aanvankelijk gedacht had [2].

Voor onze beschouwingen is slechts één van de consequenties van deze vervormingen van belang: elektronen kunnen vrij stevig in zulke vervormde roostervlakken gebonden worden, en derhalve kunnen deze roostervlakken als een soort vangplaats fungeren voor de zich elders in het kristal vrij bewegende elektronen.

Hoe moeten we ons de hier geschetste situatie voorstellen met behulp van het bandenmodel? We zien in *fig. 2* dat in het bedoelde geval energieniveaus verschijnen in het gebied van de verboden zone; dit zijn de energieniveaus van de zg. *oppervlaktoestanden* of *oppervlakcentra*. Men onderscheidt verschillende soorten van zulke oppervlaktoestanden, die onder meer verschillen wat betreft de afstand van niveau tot band.

In deze voorstelling zou het „eenvoudigste" oppervlak datgene zijn dat in het geheel géén oppervlaktoe-



a b c

Fig. 1. Schematische voorstelling van het oppervlak van een vaste stof. *a*) Een „zuiver" oppervlak; *b*) een oppervlak waaraan vreemde atomen zijn geadsorbeerd; *c*) een zuiver oppervlak waarbij de „vrije" valenties tot het ontstaan van onderlinge bindingen hebben geleid.

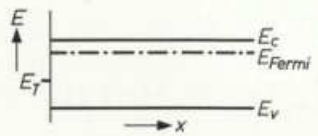


Fig. 2. Schematische voorstelling van oppervlaktoestanden in het bandenmodel. Verticaal is de elektronenenergie E, en horizontaal de plaatscoördinaat x uitgezet. E_c onderkant van de geleidingsband, E_{Fermi} Fermi-niveau, E_v bovenkant van de valentieband, E_T energieniveau van een oppervlaktoestand.

Dr. R. Memming en dr. G. Schwandt zijn medewerkers van het laboratorium Hamburg van Philips Zentrallaboratorium GmbH. Prof. dr. H. U. Harten, indertijd medewerker aan hetzelfde laboratorium, is thans hoogleraar in de Experimentele Natuurkunde aan de Universiteit te Göttingen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

standen zou hebben. Op voorstel van Brattain en Boddy zullen we zulke oppervlakken „perfect" noemen [3]. Brattain en Boddy zijn ook de eersten geweest aan wie het gelukt is perfecte oppervlakken te maken — zij het dan ook „onder water", dat wil zeggen in contact met een waterige elektrolytoplossing.

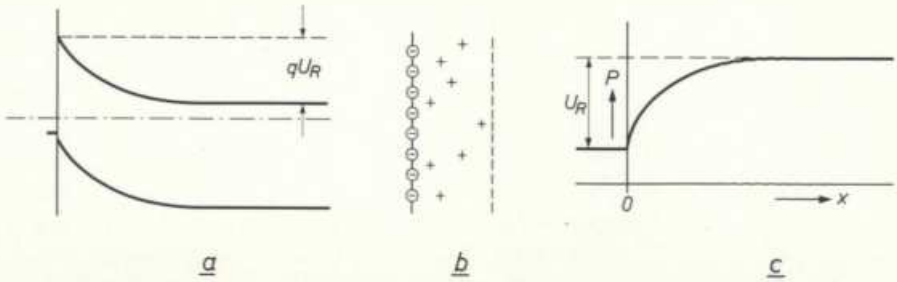


Fig. 3. *a*) Bandkromming als gevolg van oppervlaktoestanden. q elementaire lading, U_R spanning over de ruimteladingslaag. *b*) Atomaire voorstelling van het ruimteladingsgebied. *c*) Het globale verloop van de elektrostatische potentiaal P van een vrij oppervlak.

Alvorens vast te kunnen stellen of een oppervlak perfect is, zal men eerst moeten weten waaraan de aanwezigheid van oppervlaktoestanden nu in feite te merken is. Als het niveau van de oppervlaktoestanden beneden het Fermi-niveau komt (zoals in fig. 2), dan volgt een bezetting van de oppervlaktoestanden door elektronen. Er ontstaat dan een negatieve „oppervlaklading", waarvan men de ladingsdichtheid met Q_F aanduidt. De elektronen zijn uit de halfgeleider zelf afkomstig. Ze worden onttrokken aan de laag direct onder het oppervlak, en dientengevolge wordt hier tot op zekere diepte een ruimtelading opgewekt. De diepte van dit ruimteladingsgebied is bij het gewoonlijk gebruikte germanium van de orde van 1 μm. In het bandenmodel correspondeert een dergelijke ruimteladingslaag met een „bandkromming" (*fig. 3a*); over de laag staat een spanning U_R. De in de grenslaag aanwezige ruimtelading kan, zo men wil, als oppervlaklading opgevat worden, door de lading over de laagdikte te integreren. In ons voorbeeld is deze lading positief; de dichtheid per eenheid van oppervlakte zullen we met Q_R aanduiden. Daar alle elektronen aan het oppervlak afkomstig zijn uit het ruimteladingsgebied, moet gelden:

$$Q_R + Q_F = 0.$$

Fig. 3*b* geeft de atomaire voorstelling van de dubbellaag (wellicht ten overvloede zijn hierin evenveel positieve als negatieve ladingdragers getekend). In fig. 3*c* wordt ten slotte het verloop van de elektrostatische potentiaal weergegeven. Het verloop is zeer globaal aangeduid; de complicaties die ongetwijfeld optreden als gevolg van de vorming van atomaire dipoollagen aan de buitenkant van het oppervlak, willen we bij deze beschouwing verwaarlozen.

Als het ons zou lukken om door een of andere ingreep van buiten de bandkromming precies zo te regelen als we willen, dan zouden we daarmee ook de lading Q_R kunnen laten veranderen. Bovendien is het denkbaar dat bij deze ingreep de niveaus van de oppervlaktoestanden boven het Fermi-niveau gebracht kunnen worden — hun afstand tot de band ligt immers vast. Het grensvlak moet dan zijn elektronen afgeven, dat wil dus zeggen dat ook Q_F verandert. Gelukt het ten slotte om deze beide ladingsveranderingen afzonderlijk van elkaar te meten, dan is men in staat, niet alleen om het bestaan van de oppervlaktoestanden te bewijzen, maar zelfs ook om de hoogte van hun niveau vast te stellen.

Er doen zich hierbij verschillende mogelijkheden voor. Eén mogelijkheid is de capaciteit te meten van een elektrode van germanium die in een elektrolyt is gedompeld. Het schema van de meetopstelling is in *fig. 4* weergegeven. De Ge-elektrode wordt gedompeld in een bekerglas gevuld met water, waarin b.v. 0,1 mol KNO_3 per liter is opgelost om het een zeker geleidings-

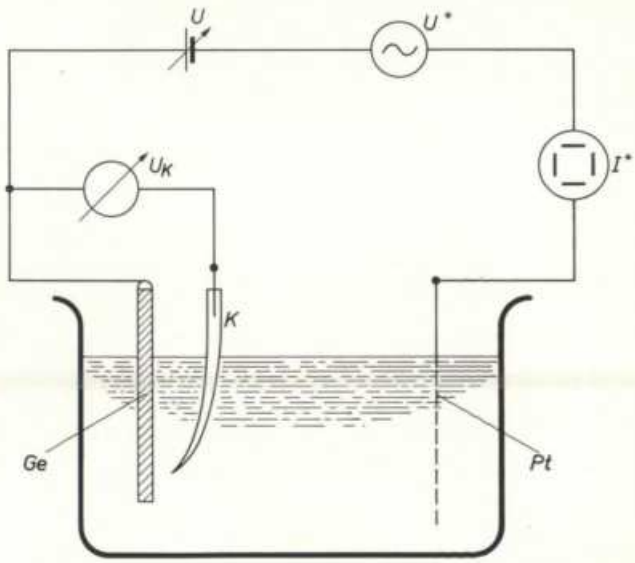


Fig. 4. Schematische voorstelling van de meetopstelling ter bepaling van de capaciteit van de germaniumelektrode *Ge*. *Pt* platinarooster; *K* standaardelektrode (kalomelelektrode); *U* variabele spanningsbron; U_K referentiespanning; *U** wisselspanningsbron, 100 kHz, enkele mV; *I** wisselstroom die met behulp van een oscillograaf onderzocht wordt.

[1] Recente overzichtsartikelen: G. Heiland, Fortschr. Physik **9**, 393, 1961; H. Flietner, Physica status solidi **2**, 221, 1962; zie bovendien de referaten van G. Heiland en H. U. Harten in Festkörperprobleme III (redactie F. Sauter), Vieweg, Brunswijk 1964.
[2] Zie b.v. J. J. Lander en J. Morrison, J. appl. Phys. **34**, 1403, 1963.
[3] W. H. Brattain en P. J. Boddy, J. Electrochem. Soc. **109**, 574, 1962.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vermogen te geven, en waaraan een buffer is toegevoegd om de *p*H op een bepaalde, constante waarde te houden. De Ge-elektrode wordt van een niet-blokkerend („ohms") contact voorzien, en via een variabele spanningsbron U verbonden met een tweede elektrode *Pt*, die een groot oppervlak dient te hebben (hiervoor kan b.v. een platina-rooster genomen worden). Nabij de Ge-elektrode wordt een standaardelektrode K aangebracht, b.v. een kalomelelektrode; tussen deze elektrode en het niet-blokkerende contact wordt de „referentiespanning" U_K gemeten. U_K kan men door verandering van U op iedere gewenste waarde instellen. Ten slotte wordt in de stroomkring opgenomen een wisselspanningsbron U^* (frequentie ca. 100 kHz, enkele mV). De hierdoor opgewekte wisselstroom I^* wordt in amplitude en faze door een oscillograaf afgebeeld, en wordt dan geïnterpreteerd met behulp van een simulatorschakeling, waarin zich een weerstand R en een condensator C in serie bevinden (of dit vervangingsschema adequaat is — althans binnen een zeker frequentie-interval —, moet men voor elk geval weer controleren door de frequentiekarakteristiek op te nemen [4]). Terwijl R gelijk is aan de som van alle zuivere weerstanden in de stroomkring, mogen we C gelijkstellen aan de capaciteit van de Ge-elektrode alléén. De met de Ge-elektrode in serie staande platina-elektrode *Pt* kunnen we nl. altijd een zo grote capaciteit geven — eenvoudig door het elektrode-oppervlak te vergroten — dat deze de meting niet in merkbare mate beïnvloedt. Zo vindt men met behulp van deze meetopstelling de capaciteit C van de Ge-elektrode als functie van de referentiespanning U_K.

Willen we aantonen dat het mogelijk is om uit dergelijke metingen conclusies te trekken aangaande de oppervlaktoestanden, dan zullen we eerst het bestaande model verder moeten ontwikkelen — het gold tot nu toe immers alleen voor droge oppervlakken (fig. 3*b* en *c*). Wat verandert er indien men de halfgeleider niet met een gas maar met een elektrolyt omgeeft? Men zal in dat geval rekening moeten houden met een vrij grote concentratie van ladingdragers *aan de andere kant* van het grensvlak, met name met de in het elektrolyt voorkomende ionen. In het beschouwde voorbeeld trekt het oppervlak positieve ionen aan. Te verwachten is dat een deel zich aan het oppervlak vasthecht. Wil het ladingsevenwicht behouden blijven, dan moeten er evenveel positieve ladingen uit het ruimteladingsgebied van de halfgeleider verdwijnen. Dit gebied wordt dus dunner — waarbij de dikte overigens wel dezelfde orde van grootte behoudt (1 μm). Bij ionen die zich in water bevinden, moeten we rekening houden met een hen omringende watermantel (het verschijnsel noemt men solvatatie); het zwaartepunt van de lading bevindt zich als gevolg hiervan op enige afstand van het eigenlijke grensvlak, op een afstand van enkele Å. De dubbellaag die zich op deze wijze in het elektrolyt vormt, de zg. laag van Helmholtz, is dus zeer dun in vergelijking met het ruimteladingsgebied in de halfgeleider. Dientengevolge komt er ondanks de grote ladingsdichtheid en de grote veldsterkte maar weinig spanning over deze laag te staan, en mag men verwachten dat de potentiaal globaal verloopt zoals in *fig. 5* is aangegeven. Dat zou betekenen dat de „Galvani-spanning" U_G vrijwel gelijk is aan

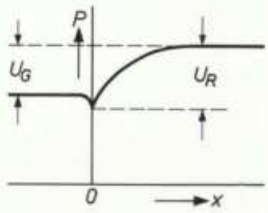


Fig. 5. Het globale verloop van de elektrostatische potentiaal P aan het grensvlak halfgeleider-elektrolyt. U_G Galvani-spanning.

de spanning U_R die over het ruimteladingsgebied staat. Er is echter reden om bij deze laatste conclusie een vraagteken te plaatsen. In fig. 5 is het potentiaalverloop al te zeer vereenvoudigd weergegeven. We mogen in feite niet zover gaan hieruit te concluderen dat de spanning over de Helmholtz-laag klein is, maar wel dat deze constant is. Dat zou dan betekenen dat een *verandering* ΔU_G van de Galvani-spanning — die het gevolg is van een verandering in de uitwendige spanning U, en die we vinden door de referentiespanning U_K te meten — gelijk is aan een *verandering* ΔU_R van de spanning die over de ruimteladingslaag staat:

$$\Delta U_G = \Delta U_K = -\Delta U_R$$

(het minteken is slechts het gevolg van verschillende afspraken wat betreft de voortekens van U_K en U_R). Steeds dient wel geverifieerd te worden of aan het bovenstaande inderdaad voldaan wordt. Als dit het geval is, kunnen we de bandkromming naar wens variëren — de verandering wordt ons dan immers steeds gegeven door de referentiespanning. In dat geval zal bovendien ook de wisselspanning U^* — tenminste zolang de frequentie binnen bepaalde grenzen blijft — met een volkomen gelijke variatie door de bandkromming worden „overgenomen" ($U^* = U_R^*$). Hiermee gaat gepaard een synchrone variatie Q_R^* van de lading in het ruimteladingsgebied, en eventueel ook van de lading in het grensvlak (Q_F^*). De ladingen in de Helmholtz-laag werken hierbij compenserend en handhaven over het geheel de elektroneutraliteit. Aan de ladingsvariaties Q_R^* en Q_F^* beantwoorden twee differentiële capaciteiten: de „ruimteladingscapaciteit" $C_R = Q_R^*/U_R^*$ en de „capaciteit der oppervlakcentra" $C_F = Q_F^*/U_R^*$. Een meetopstelling zoals in fig. 4 geeft ons de som

[4] R. Memming, Philips Res. Repts. **19**, 323, 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van deze beide capaciteiten (althans in een bepaald frequentie-interval).

Om zulke metingen volledig te kunnen „uitbuiten", is het nodig de samenhang tussen de bandkromming en de beide capaciteiten, zoals die uit het model volgt, kwantitatief te kennen. Voor ons doel kunnen we echter met een benadering volstaan. We zullen hierbij eerst de capaciteit C_F van de oppervlakcentra onder de loep nemen.

Een positieve waarde van U_R betekent per definitie N-geleiding aan het oppervlak, in het algemeen dus een *neer*waartse kromming van de band. De kromming kan steeds zo sterk gemaakt worden dat het energieniveau van de stoorcentra beneden het Fermi-niveau komt, en het grensvlak dientengevolge geheel door elektronen bezet wordt. Q_F bereikt dan zijn (negatieve) maximale waarde $Q_{F\,max} = qn_T$ (n_T is de dichtheid van de oppervlakcentra per eenheid van oppervlakte). Omgekeerd kan bij een voldoend grote negatieve waarde van U_R (*op*waartse kromming) het niveau van de oppervlakcentra zo ver boven het Fermi-niveau gebracht worden dat Q_F gelijk aan nul wordt. De verandering van lading voltrekt zich in een betrekkelijk klein spanningsinterval van U_R, met name in het interval waarin het niveau van de oppervlakcentra en het Fermi-niveau ongeveer gelijk zijn: het verloop van Q_F wordt gegeven door de Fermi-functie (zie *fig. 6*). De helling van deze curve verloopt

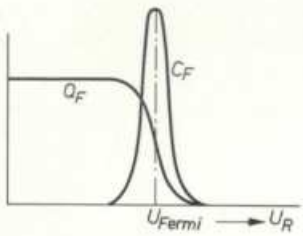


Fig. 6. De lading Q_F en de capaciteit C_F van de stoorcentra aan het oppervlak als functie van de bandkromming (schematisch). Bij $U_R = U_{Fermi}$ liggen de niveaus van de stoorcentra precies ter hoogte van het Fermi-niveau.

in overeenstemming met de capaciteit C_F van de oppervlakcentra. De curve heeft een maximum bij $U_R = U_{Fermi}$, dat wil zeggen als het niveau van de oppervlakcentra juist gelijk is aan het Fermi-niveau. Uit de absolute waarde van de capaciteit kunnen we $Q_{F\,max}$ en daarmee ook de dichtheid van de oppervlakcentra n_T berekenen.

Voor de ruimteladingscapaciteit C_R is de benadering veel minder gemakkelijk. Daarom zal hier alleen een zeer eenvoudig geval behandeld worden, namelijk het geval dat het germanium intrinsiek geleidend is. Als U_R nul is, is óók het oppervlak intrinsiek geleidend; overal in het kristal is in dat geval de concentratie van de elektronen zowel als die van de gaten gelijk aan de intrinsieke concentratie n_i (de gebroken lijn in *fig. 7*). Dit wordt anders als we U_R een van nul afwijkende waarde geven. Bij een neerwaartse bandkromming (U_R positief) brengen we een verhoging van de elektronenconcentratie te weeg, met een maximum aan het oppervlak, en een daling over de grenslaag tot de concentratie weer n_i is geworden (curve n in fig. 7).

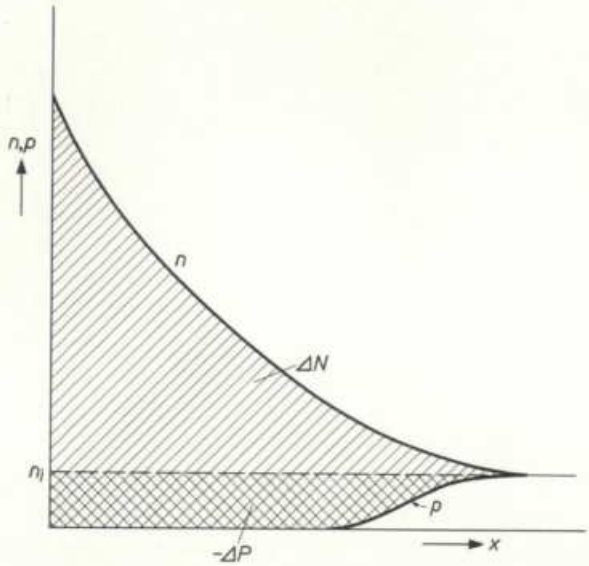


Fig. 7. Schematische voorstelling van het concentratieverloop van de elektronen (n) en van de gaten (p) in het ruimteladingsgebied van intrinsiek geleidend germanium. n_i intrinsieke concentratie, x plaatscoördinaat. Het enkel gearceerde vlak is een maat voor de oppervlaktedichtheid ΔN van de in overmaat aanwezige elektronen; het dubbel gearceerde vlak is een maat voor de oppervlaktedichtheid ΔP van de in overmaat aanwezige gaten.

Het is duidelijk dat het enkel gearceerde vlak in de figuur een maat is voor de per eenheid van elektrode-oppervlakte gerekende dichtheid ΔN van alle in overmaat aanwezige elektronen. ΔN heeft een relatief grote positieve waarde, die met toenemende U_R sterk stijgt (*fig. 8a*). Tegenover de toeneming van de elektronenconcentratie bij een neerwaartse bandkromming staat

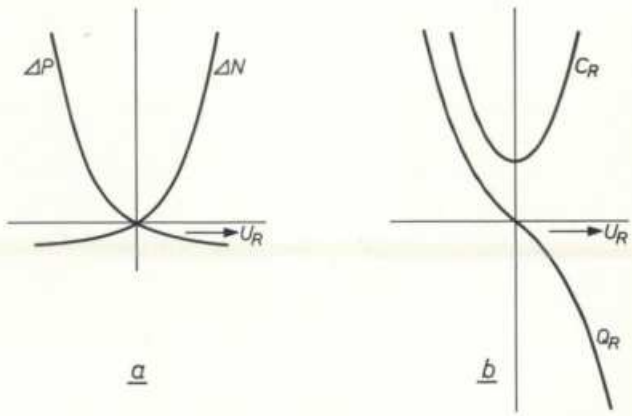


Fig. 8. *a*) De invloed van de bandkromming U_R op de ladingsdichtheid ΔN en ΔP van in overmaat aanwezige ladingdragers in de ruimteladingslaag van intrinsiek geleidend germanium (schematisch).
b) De lading Q_R en de capaciteit C_R van de ruimteladingslaag als functie van de bandkromming U_R bij intrinsiek geleidend germanium (schematisch).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een verlaging van de concentratie van de gaten, die evenwel beperkt wordt door het feit dat de concentratie niet kleiner dan nul kan worden. De oppervlaktedichtheid ΔP van de in overmaat aanwezige gaten is negatief en, in absolute waarde, relatief klein (het dubbel gearceerde vlak in fig. 7). Verandert men de neerwaartse bandkromming ($U_R > 0$) in een opwaartse ($U_R < 0$), dan verwisselen de elektronen en gaten van rol (fig. 8*a*). Voor de totale lading in de grenslaag, berekend per eenheid van oppervlakte, schrijven we thans:

$$Q_R = q(\Delta P - \Delta N),$$

waarin q de elementaire lading voorstelt (en waarbij het minteken afkomstig is van het negatieve ladingsteken van de elektronen). Zetten we deze ladingsdichtheid uit tegen de bandkromming, dan verkrijgen we een S-vormige curve met een buigpunt bij $U_R = 0$ (fig. 8*b*). De helling van de curve verloopt wederom in overeenstemming met de capaciteit; C_R heeft een minimum bij $U_R = 0$. Kwalitatief heeft de ruimteladingscapaciteit dus het omgekeerde verloop als de capaciteit van de oppervlakcentra.

Uit de figuren 6 en 8*b* komt nog het volgende naar voren: laat men U_R b.v. in positieve waarde toenemen, dan nemen Q_F en Q_R beide in negatieve waarde toe — ze veranderen dus beide in dezelfde richting. Dit betekent dat de te meten capaciteit verkregen wordt door additie van de afzonderlijke bijdragen. Als nu bovendien de gemeten waarde overeenstemt met de theoretische waarde van de ruimteladingscapaciteit, dan is het oppervlak, in de betekenis die de experimentele fysicus eraan hecht, „perfect". (Uit de overeenstemming van de waarden volgt dan immers dat C_F nul is.) Streng theoretisch beschouwd, is deze conclusie niet waterdicht: het is in principe mogelijk dat er oppervlaktoestanden zijn die zich aan de capaciteitsmeting onttrekken.

Ter illustratie moge *fig. 9* dienen. De metingen zijn verricht aan intrinsiek geleidend germanium [4]. De meetpunten zijn uitgezet tegen U_K (bovenste schaal), terwijl de berekende curve is uitgezet tegen U_R (onderste schaal). Het aanvankelijk onbekende (en oninteressante) verschil tussen beide spanningen is bepaald door de schalen zo te verschuiven dat de meetpunten en de berekende curve zo goed mogelijk samenvielen. Hiervoor was ook een verschuiving in *verticale* richting nodig. Dit betekent, gezien de logaritmische schaal in deze richting, een vermenigvuldiging: de theoretische waarden werden in dit geval met een factor 1,3 vermenigvuldigd. Deze factor noemt men de „ruwheidsfactor": de oppervlakte van de elektrode is in werkelijkheid, als gevolg van een zekere oneffenheid, groter dan de geprojecteerde oppervlakte.

Uit de overeenstemming van de gemeten en de berekende waarden kan men twee conclusies trekken:
1) Variaties in de aangelegde spanning vindt men inderdaad geheel terug in de variaties van de spanning over het ruimteladingsgebied ($\Delta U_K = -\Delta U_R$),
2) het oppervlak was perfect ($C_F = 0$).

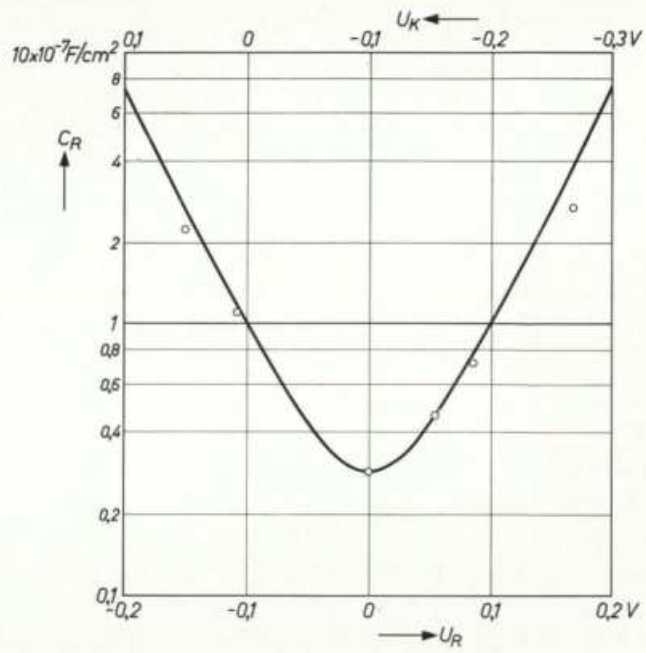


Fig. 9. De capaciteit van een intrinsiek geleidende germaniumelektrode [4]. De meetpunten zijn uitgezet tegen de referentiespanning U_K, de curve geeft de berekende capaciteit C_R van de ruimteladingslaag, als functie van de bandkromming U_R.

Het recept voor het maken van zulke perfecte germaniumoppervlakken blijkt uiteindelijk zeer eenvoudig te zijn. In een waterig elektrolyt van „voldoende zuiverheid", dat neutraal of alkalisch mag zijn, plaatst men een elektrode van germanium die men een positieve spanning geeft. Als gevolg van elektrochemische processen gaan er een aantal van de buitenste roostervlakken in oplossing (anodische oxidatie). Zet men hierna de spanning af, dan heeft men voor enige seconden, minuten of zelfs uren — dit hangt af van de zuiverheid van het elektrolyt — een perfect oppervlak.

Voegt men koperionen aan het elektrolyt toe, dan wordt deze toevoeging onmiddellijk bij de capaciteitsmeting geregistreerd (*fig. 10*). Er hebben zich blijkbaar stoorcentra aan het oppervlak gevormd, en nog wel twee soorten met verschillende energieniveaus (*fig. 11*) [5]. Soortgelijke oppervlaktoestanden kunnen ook door zilver- of goudionen geïnduceerd worden. De hoogte van de niveaus hangt van de aard van de toegevoegde ionen af. Hun oppervlaktedichtheid is steeds van de orde van grootte van 10^{11} cm^{-2}. Dat komt overeen met één stoorcentrum op enige duizenden germaniumatomen van het oppervlak. De hoeveelheid die men nodig heeft om deze dichtheid te bereiken, is onaangenaam klein: enkele microgrammen per liter

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

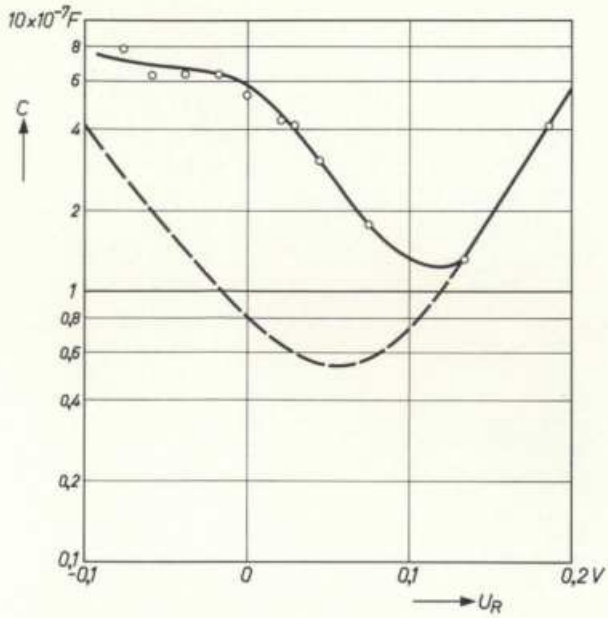


Fig. 10. De capaciteit C van een germaniumelektrode in een elektrolyt waarin 5×10^{-7} mol Cu $(NO_3)_2$ per liter is opgelost (getrokken lijn). De onderbroken lijn geeft de capaciteit van een „schone" germaniumelektrode (vgl. fig. 9). (Volgens P. J. Boddy en W. H. Brattain [5].)

zijn reeds voldoende. Uit andere metingen [5] is verder gebleken dat de stoorcentra met een kleine capaciteit en oppervlaktedichtheid in het algemeen „recombinatiecentra" zijn: via deze centra is het voor een elektron mogelijk om van de geleidingsband in de valentieband te komen. Hiernaast onderscheidt men de „grotere" stoorcentra, de zg. vangplaatsen; deze kunnen slechts één soort ladingdragers vangen, en niets anders doen dan deze na enige tijd weer afgeven. Of het vangplaatsen zijn voor elektronen of voor gaten, kan met de tot nu toe besproken metingen niet bepaald worden.

Op dit punt komen we weer verder met capaciteitsmetingen aan N-geleidend germanium. Om dit te kunnen begrijpen, is het nodig dat we nader ingaan op het elektrochemisch gedrag van germanium, en met name op het gedrag van germanium bij anodische oxidatie.

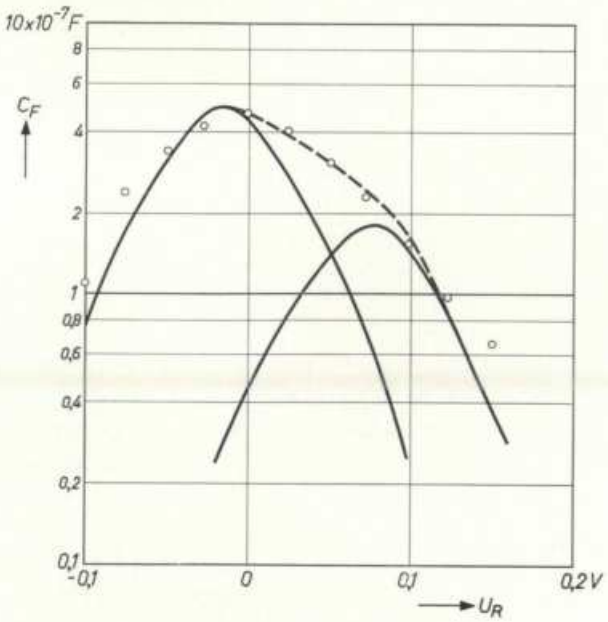


Fig. 11. De capaciteit C_F van een germaniumelektrode met een oppervlak waarop zich geïnduceerde Cu-centra bevinden. Voor verdere gegevens, zie fig. 10.

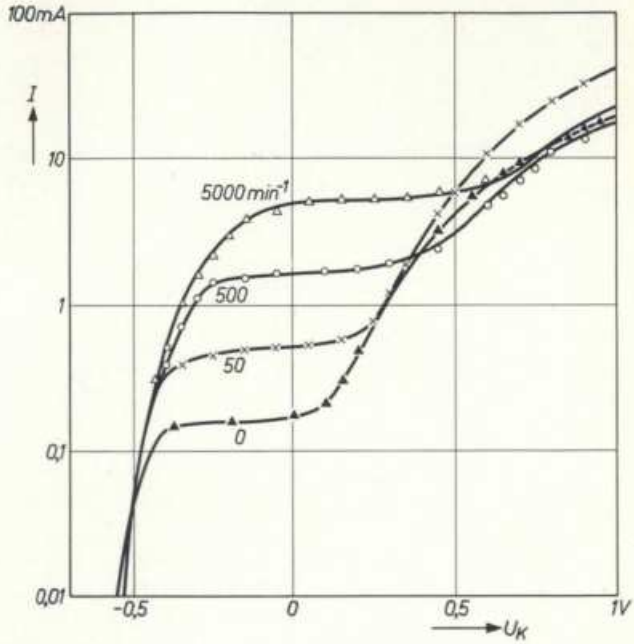


Fig. 12. Stroom-spanningskarakteristiek bij anodische oxidatie van P-geleidend germanium. De parameter is het toerental van de roterende elektrode. (Volgens H. G. Schmidt en G. Schwandt [7].)

Het is bekend dat germanium als vierwaardig positief ion in oplossing gaat, en dat het in een alkalisch waterig milieu germanaationen vormt, volgens de vergelijking [6]:

$$Ge^{4+} + 6\,OH^- \rightarrow GeO_3^{2-} + 3\,H_2O.$$

De snelheid waarmee het germanium bij anodische oxidatie in oplossing gaat, kan gemakkelijk bepaald worden door de stroom te meten die door het grensvlak vloeit. Deze stroom zal toenemen als men de aangelegde spanning verhoogt, dus als men U_K sterker positief maakt. De onderste curve in *fig. 12* laat echter zien (de meting is in dit geval verricht aan P-geleidend germanium [7]) dat er na een zekere toeneming een verzadiging van de stroom optreedt. (Dat bij nog hogere spanningen, ten gevolge van het optreden van een nieuw mechanisme, de stroom weer gaat toenemen, doet in dit

[5] P. J. Boddy en W. H. Brattain, J. Electrochem. Soc. **109**, 812, 1962.
[6] F. Jirsa, Z. anorg. allgem. Chemie **268**, 84, 1952.
[7] H. G. Schmidt en G. Schwandt, Phys. Verhandl. **14**, 44, 1963 (no. 1/2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

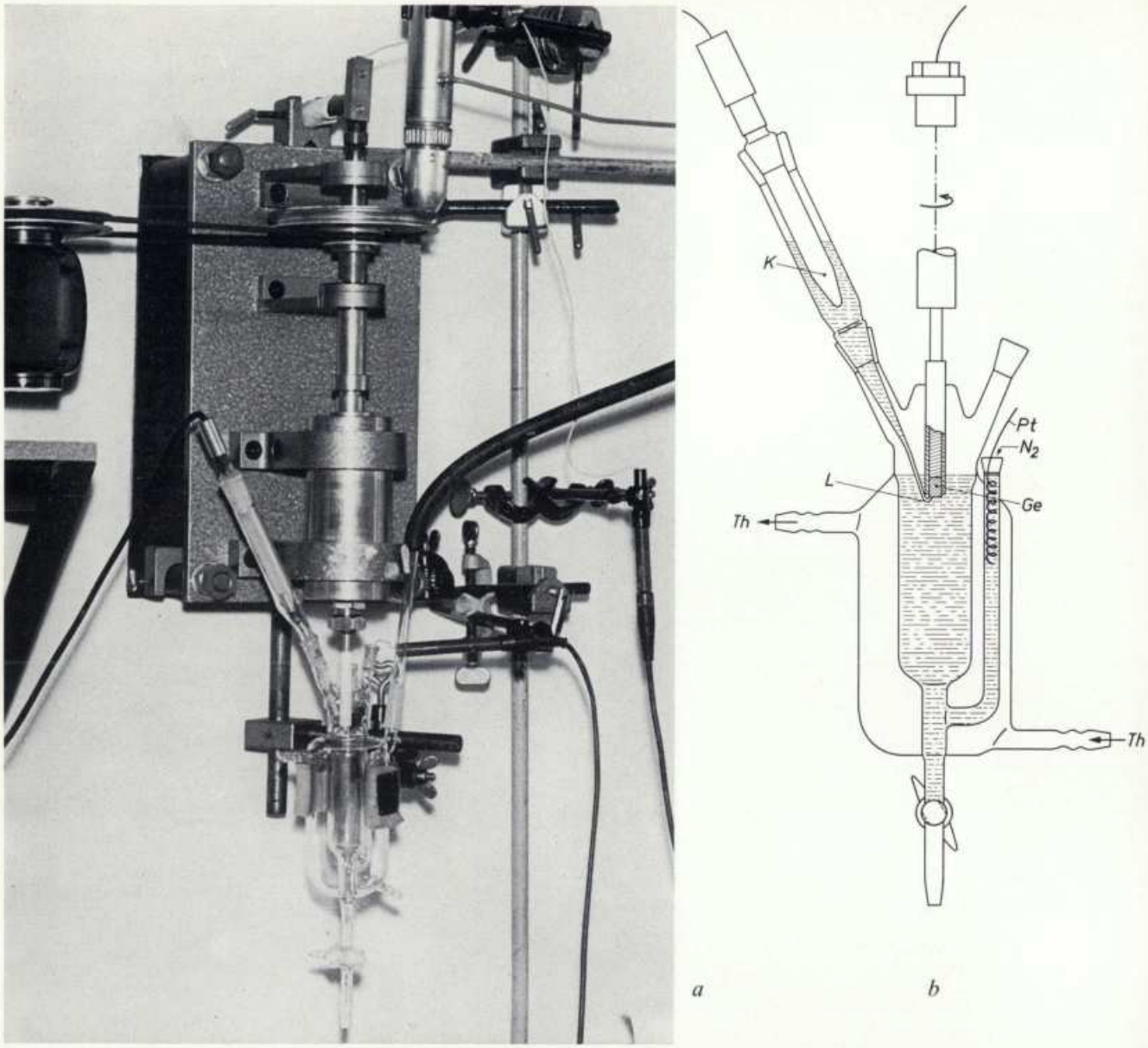


Fig. 13. Meetopstelling met roterende elektrode; *a*) overzicht van de gehele opstelling, *b*) schema van het meetvat. *Ge* roterende elektrode, *Pt* platina-elektrode, *K* kalomelelektrode met Luggin-capillair *L*, *Th* aansluitingen voor de thermostaat.

verband niet ter zake.) Dergelijke verzadigingen van de stroom worden doorgaans verklaard door aan te nemen dat de aanvoer van één van de reactiepartners niet snel genoeg gaat. Dat zou in dit geval dus de aanvoer van Ge- of van OH-ionen zijn. Daar germanium uiteraard in voldoende mate aan het elektrode-oppervlak aanwezig is, zullen we de oorzaak bij de OH-ionen moeten zoeken. Het anodisch oplossen van het germanium doet de OH-ionenconcentratie aan het oppervlak dalen. Er ontstaat een concentratieverval van OH-ionen in het elektrolyt, en dit heeft een diffusiestroom tot gevolg, die nieuwe OH-ionen aanvoert. Deze diffusie bepaalt de snelheid van de reactie. De diffusiesnelheid is aan een grens gebonden: de concentratie kan nu eenmaal niet kleiner dan nul worden, en het concentratieverval kan dus niet onbeperkt groot zijn.

Nu kan echter een diffusiestroom in een vloeistof altijd aangevuld worden met een convectiestroom. Op grond hiervan mogen we verwachten dat we de verzadigingsstroom kunnen verhogen door te roeren.

Roeren kan men, op een eenvoudige en tegelijk doeltreffende wijze, met een zg. „roterende elektrode". Dat is een cilindervormig uitgevoerde elektrode die om zijn as kan draaien. *Fig. 13* toont de opstelling die door ons gebruikt is. Theoretisch is te verwachten dat de verzadigingsstroom zal toenemen met de wortel uit het toerental van de roterende elektrode [8]. Een experimentele bevestiging vinden we in fig. 12 en *fig. 14* [7]; in de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

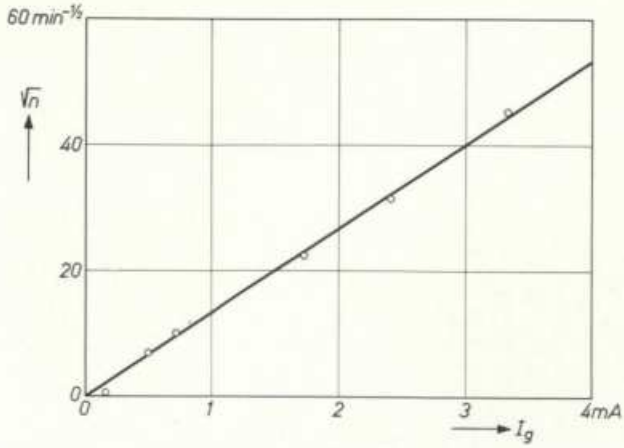


Fig. 14. De verzadigingsstroom I_g als functie van de wortel uit het toerental n van de roterende elektrode. Verder dezelfde gegevens als in fig. 12.

eerste figuur zien we dat de anodische oxidatie van germanium inderdaad door roeren versneld wordt, in de tweede figuur dat de toeneming met de wortel uit het toerental plaatsvindt. Het theoretische model waarmee we deze verschijnselen hebben trachten te begrijpen, blijkt dus heel goed te voldoen, althans voor *P*-geleidend germanium. *N*-geleidend germanium reageert namelijk nauwelijks op roeren, bovendien lost het heel wat langzamer op (*fig. 15*) [9]. De oorzaak hiervan kan niet bij de OH-ionen liggen.

Hier komt aan het licht dat de gemaakte veronderstelling dat germanium aan het grensvlak altijd in voldoende mate aanwezig is, niet geheel op goede gronden berustte. Weliswaar zijn germanium*atomen* in onbeperkte mate ter beschikking, maar voor de reactie zijn *ionen* nodig. Om deze ionen te kunnen vormen, moeten de atomen òf elektronen aan het kristal afgeven, òf gaten met zich meevoeren. In werkelijkheid gebeurt het allebei: elk atoom geeft twee elektronen (e^-) af, en neemt twee gaten (e^+) mee. De reactievergelijking voor

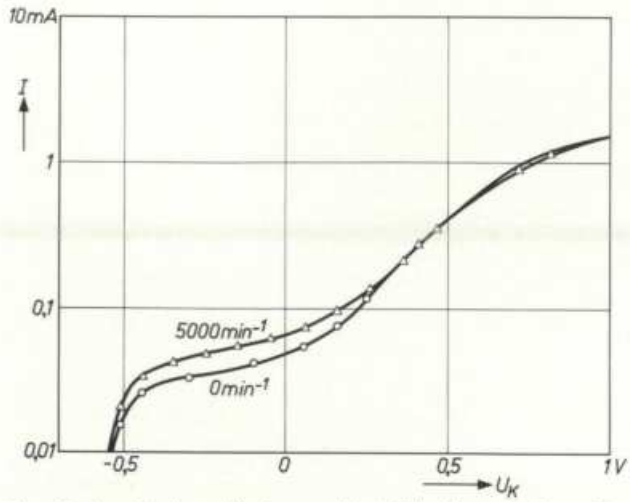


Fig. 15. Anodische oxidatie van *N*-geleidend germanium. De parameter is, evenals in fig. 12, het toerental van de roterende elektrode. (Volgens G. Schwandt en M. Scheer [9].)

de anodische oplossing van germanium in een alkalisch, waterig milieu schrijven we als volgt [10]:

$$Ge + 2e^+ + 6OH^- \rightarrow GeO_3^{2-} + 2e^- + 3H_2O.$$

Nu heeft *P*-geleidend germanium een overmaat aan gaten; de ionen vormen zich dus snel en beïnvloeden de reactiesnelheid niet. Maar bij *N*-geleidend germanium is het aantal gaten gering. Naarmate de reactie vordert, daalt hun concentratie, en we zien weer dezelfde verschijnselen als we eerder voor OH-ionen beschreven: het optreden van een aanvullende diffusiestroom van gaten, die echter niet boven een maximale waarde komt. Is de maximale diffusiesnelheid voor gaten lager dan die voor OH-ionen, dan is het de diffusie van gaten

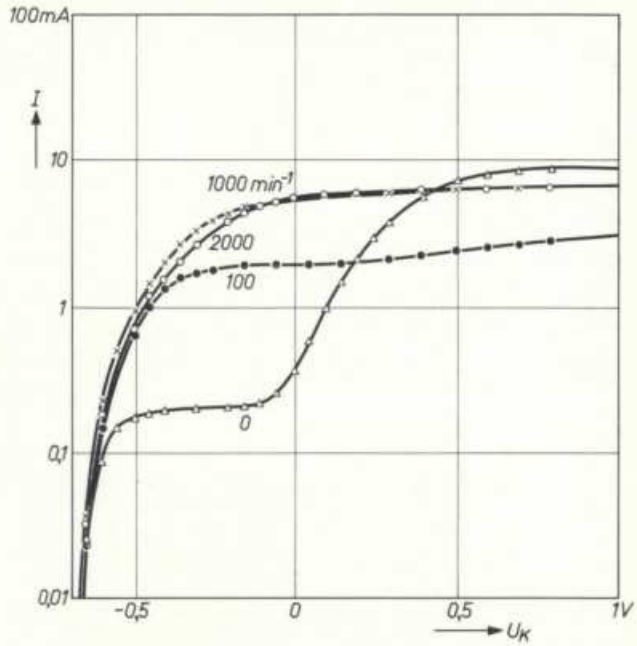


Fig. 16. Anodische oxidatie van *N*-geleidend germanium bij belichting. De parameter is wederom het toerental van de roterende elektrode. (Volgens G. Schwandt en M. Scheer [9].)

die — als de langzaamste stap in het proces — de snelheid van de gehele reactie bepaalt. En hier heeft men dan meteen de reden waarom de anodische oxidatie van *N*-geleidend germanium zich niet door roeren laat versnellen.

Wèl moet dit mogelijk zijn als er extragaten worden aangevoerd. Dit is te bereiken door het germanium te belichten: de geabsorbeerde lichtquanten doen dicht bij het oppervlak paren van ladingdragers ontstaan, waarvan de gaten voor de reactie gebruikt kunnen worden. *Fig. 16* laat zien dat de verzadigingsstroom bij anodische oxidatie inderdaad toeneemt bij belichting, en dat tegelijk ook het roeren weer van invloed wordt [9]. Dit is begrijpelijk, daar de belichting zoveel gaten heeft doen

[8] B. Lewitsch, Acta physicochimica USSR **17**, 257, 1942.
[9] G. Schwandt en M. Scheer, niet gepubliceerd.
[10] F. Beck en H. Gerischer, Z. Elektrochemie, Ber. Bunsenges. phys. Chemie **63**, 500, 1959.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ontstaan dat niet meer de gaten, maar wederom de OH-ionen de snelheid van het oplossen bepalen. Maar ook in deze toestand kan weer verandering komen: bij zeer hoge toerentallen wint de aanvoer van OH-ionen het weer, en zijn opnieuw de gaten de beperkende factor. Soortgelijke verschijnselen kan men overigens ook waarnemen bij onbelicht *N*-geleidend germanium van hoge weerstand.

Nu keren we terug tot de besproken capaciteitsmetingen. Deze metingen moeten in het algemeen verricht worden in een potentiaalinterval waarbij germanium langzaam anodisch geoxideerd wordt. Voor intrinsiek geleidend germanium heeft dit feit verder geen consequenties, wel echter voor *N*-geleidend germanium. Het verbruik van gaten voor het anodische oplossingsproces is zo groot dat de concentratie van gaten aan het oppervlak geen kans krijgt om toe te nemen, ook niet als de bandkromming dit in feite vereist. Om dezelfde reden dragen de gaten ook niet bij tot de lading in het ruimteladingsgebied. Q_R bereikt, aangezien de lading dus alleen door elektronen bepaald wordt, bij een opwaartse kromming van de band (U_R negatief) slechts een betrekkelijk kleine positieve waarde. De stijging van de capaciteit die normaliter door de gaten wordt veroorzaakt, blijft achterwege; als we U_R in negatieve richting veranderen, neemt de capaciteit monotoon af (*fig. 17*). Metingen bevestigen dit beeld (*fig. 18*) [11].

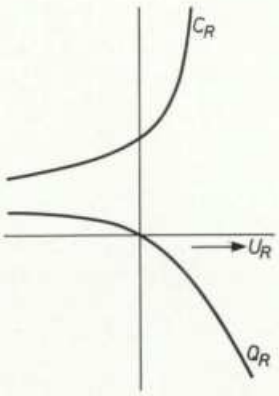


Fig. 17. De ladingsdichtheid Q_R en de capaciteit C_R van de ruimteladingslaag terwijl een reactie plaatsvindt die voortdurend gaten aan het oppervlak onttrekt (schematisch).

Merkwaardig genoeg blijkt uit metingen dat de capaciteit in dit geval *niet* verandert indien we aan het elektrolyt koperionen toevoegen. Deze verrassende ontdekking dwingt tot de conclusie dat de door de koperionen gevormde stoorcentra *vangplaatsen voor gaten* moeten zijn. De gedachtegang is als volgt. Zoals uit metingen met radioactieve isotopen gebleken is, wordt Cu zowel door *N*-geleidend als door *P*-geleidend en door intrinsiek geleidend germanium op precies dezelfde

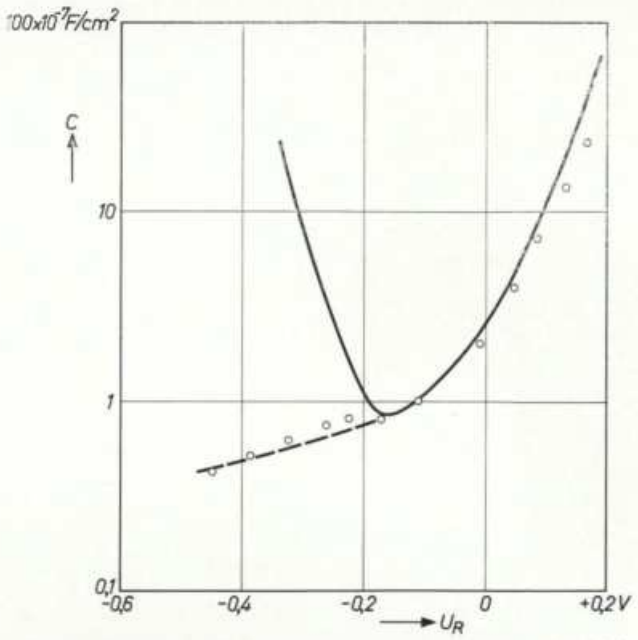


Fig. 18. De capaciteit C van een *N*-geleidende germaniumelektrode [11]. De meetpunten zijn uitgezet tegen de bandkromming U_R. De getrokken curve geeft het capaciteitsverloop van een intrinsiek geleidende germaniumelektrode, vgl. fig. 9.

wijze geadsorbeerd [12]. Men mag derhalve verwachten dat de geïnduceerde oppervlaktoestanden in alle drie de gevallen dezelfde zullen zijn. Dat wil zeggen dat er aan het oppervlak van *N*-geleidend germanium evenzeer vangplaatsen gevormd zullen worden als bij de andere materialen. Als uit de capaciteitsmetingen hun aanwezigheid *niet* valt af te leiden, dan moet het zo zijn dat ze ondanks de variatie in bandkromming niet van lading kunnen veranderen. Dit zal het geval zijn als het vangplaatsen zijn voor ladingdragers die aan het oppervlak ontbreken. En dat zijn, in het potentiaalinterval van de anodische oxidatie, de gaten.

Samenvatting. Voor het onderzoek van oppervlakverschijnselen van halfgeleiders wordt gebruik gemaakt van germaniumelektrodes in contact met een waterig elektrolyt. Variaties in de aangelegde spanning worden, indien aan bepaalde voorwaarden is voldaan, geheel teruggevonden in variaties van de spanning die over het ruimteladingsgebied van het germanium staat. Hiermee corresponderen ladingsvariaties in het ruimteladingsgebied en eventueel ook aan het oppervlak. Deze ladingsvariaties komen tot uiting in de capaciteit van de elektrode. Uit de capaciteitsmetingen kunnen de ladingsdichtheid en de dissociatie-energie van de oppervlaktoestanden bepaald worden. Onder heel speciale voorwaarden is het mogelijk om zg. „perfecte" oppervlakken te verkrijgen, d.w.z. oppervlakken zonder stoorcentra. Uiterst geringe hoeveelheden Cu^{II}-ionen in het elektrolyt zijn echter reeds voldoende om stoorcentra te doen ontstaan. Andere metingen tonen aan dat voor de anodische oxidatie van germanium zowel OH-ionen als gaten nodig zijn. De snelheid van de anodische oxidatie kan verhoogd worden door het elektrolyt te roeren. Bij *N*-geleidend germanium kan hetzelfde effect ook bereikt worden door belichting. De kennis van deze verschijnselen en de diverse hierop gebaseerde metingen maken het mogelijk om een nader inzicht te verkrijgen in de eigenschappen van oppervlaktoestanden.

[11] R. Memming, Physics Letters **7**, 89, 1963.
[12] R. Memming, Surface Science **2**, 436, 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Lichtbronnen en fotocellen van galliumfosfide

H. G. Grimmeiss, W. Kischio en H. Scholz

621.383:546.681'183

Bereiding en dotering van GaP

Onder de halfgeleiders met betrekkelijk grote bandafstand heeft galliumfosfide speciale belangstelling gewekt, o.a. omdat deze stof, met bandafstand 2,25 eV, geschikt is voor het maken van *P-N*-stralingsbronnen die in het zichtbare gebied emitteren.

Allereerst was het zaak uiterst zuiver galliumfosfide te bereiden, aangezien, zoals later zal blijken, het rendement van een van galliumfosfide gemaakte lichtbron ten sterkste afhangt van de zuiverheid van het materiaal waarvan men uitgaat. De bereiding van galliumfosfide geschiedt door fosforwaterstof op gallium te laten inwerken. Fosforwaterstof kan men in zeer zuivere toestand en met een behoorlijke opbrengst verkrijgen door aluminiumfosfide met water te ontleden. Het hiertoe nodige aluminiumfosfide wordt uit aluminium en fosfor verkregen. In een ijzeren kroes wordt een mengsel van aluminiumpoeder en rode fosfor (atoomverhouding 1 : 1,1) ontstoken. De reactie is tamelijk heftig en een deel van de fosfor ontwijkt als gas in de atmosfeer, alwaar hij verbrandt (*fig. 1*). Het hierbij ontstane aluminiumfosfide vormt een gesinterde, poreuze koek van gele kleur.

De synthese van galliumfosfide vindt plaats met behulp van de in *fig. 2* geschetste opstelling. Aluminiumfosfide wordt in een stikstofatmosfeer in de ronde kolf gebracht en door toevoeging van water ontleed. Het aldus ontstane vochtige gas wordt eerst door een waterkoeler gevoerd, waarin zich het grootste deel van het water afscheidt. Daarop volgen twee koelvallen die door een mengsel van koolzuursneeuw en aceton op −78 °C worden gehouden. Hierna komt de fosforwaterstof in de oven, waarin het gallium wordt verhit. Het verhitten gebeurt eerst tot op ongeveer 800 °C in een waterstofstroom, pas dan wordt op fosforwaterstof overgeschakeld. De temperatuur wordt nu tot 1200 °C opgevoerd en 2 uur op deze waarde gehandhaafd.

Fig. 1. Reactie tussen aluminiumpoeder en rode fosfor ter bereiding van aluminiumfosfide.

Dr. H. G. Grimmeiss, dr. W. Kischio en dr. H. Scholz zijn medewerkers van het laboratorium Aken van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

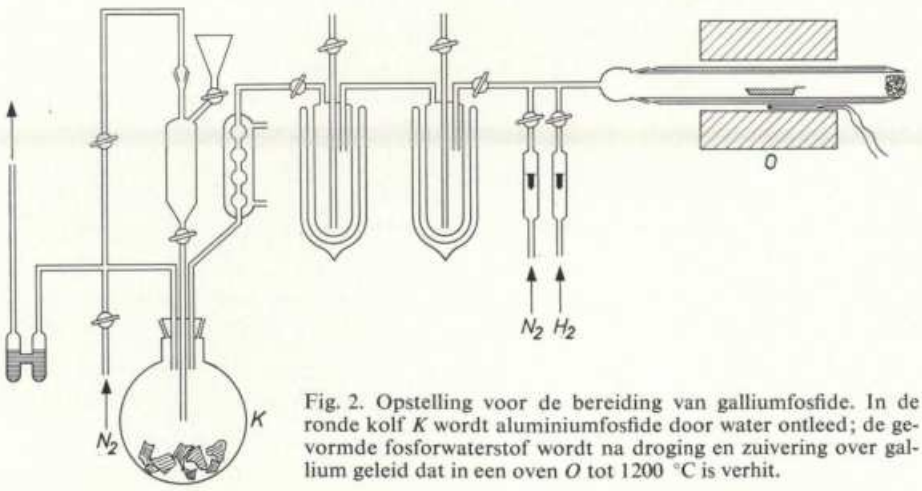


Fig. 2. Opstelling voor de bereiding van galliumfosfide. In de ronde kolf *K* wordt aluminiumfosfide door water ontleed; de gevormde fosforwaterstof wordt na droging en zuivering over gallium geleid dat in een oven *O* tot 1200 °C is verhit.

Bij de reactie wordt ongeveer 1/5 van het gallium in galliumfosfide omgezet. Men krijgt oranjekleurige GaP-plaatjes ter grootte van ca. 4 × 4 × 0,2 mm³. De GaP-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

plaatjes zijn in hoofdzaak monokristallijn, met als platte zijde een (111)-vlak. Dikwijls treden echter ook tweelingen op met (111) als tweelingvlak. De concentratie van de gezamenlijke verontreinigingen bedraagt minder dan 10^{-3} %. De aanwezigheid van koolstof, die in het galliumfosfide de luminescentie-eigenschappen nadelig beïnvloedt, kon met de gebruikte analysemethode niet worden aangetoond, de concentratie moet derhalve minder dan 5×10^{-4} % bedragen. Deze niet opzettelijk gedoteerde kristallen vertonen slechts een zeer zwakke luminescentie.

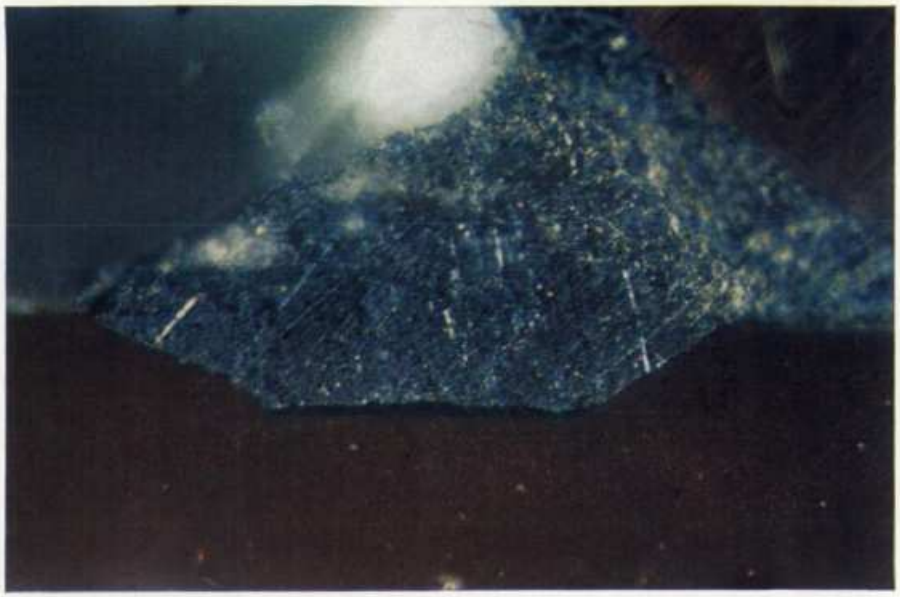


Fig. 3. Microfoto van een doorsnede van een *P-N*-overgang in galliumfosfide met Sn-contact. Onderaan bevindt zich het *P*-geleidende galliumfosfide; rechts bovenaan ziet men de koperdraad waarmede de stroom wordt toegevoerd.

Ten einde goed luminescerend galliumfosfide te verkrijgen, moet de stof op de juiste wijze worden gedoteerd. Een zeer doelmatige dotering blijkt die met zink en zink-zuurstof te zijn. Zink veroorzaakt een groene, zink-zuurstof een rode emissie met een maximum bij 700 nm. Zoals we nog zullen zien, zijn speciaal de rood luminescerende kristallen van belang gebleken. Zuurstof en zink kunnen als ZnO of $Zn_3(PO_4)_2$ worden toegevoerd. Door gebruik van een zink-zuurstofverbinding wordt echter de atoomverhouding Zn:O vastgelegd. Daarentegen kan men de atoomverhouding Zn:O willekeurig wijzigen indien men als zuurstofbron Ga_2O_3 of $GaPO_4$ naast zink of zinkoxide gebruikt.

Om gedoteerde kristallen te maken, brengt men galliumfosfide, gallium en de dotering in een kwartsampul, die bij 400 °C in vacuüm wordt uitgegloeid en daarna afgesmolten. De ampul wordt vervolgens in een oven verhit tot 1230 °C. Het galliumfosfide wordt hierbij opgelost en vormt met het gallium een homogene smelt. Ten einde behoorlijke kristallen te verkrijgen, koelt men de smelt langzaam af. Dit doet men door de ampul uit de verticaal geplaatste oven te laten zakken. Tussen de galliumsmelt en het galliumfosfide stelt zich een verdelingscoëfficiënt voor zink van ongeveer 1 in. Tegelijkertijd vindt tijdens het omkristalliseren van het galliumfosfide een verdeling van de verontreinigingen tussen het kristal en de smelt plaats. Dit leidt tot een verdere verbetering van de zuiverheid van het uitkristalliserende galliumfosfide.

Een bijzonder effectieve dotering met koper kan men verkrijgen door een doteringsproces in twee trappen. Galliumfosfide en koper worden bij 400 °C in lucht onder 0,5 torr met elkaar in aanraking gebracht. Hierbij diffundeert koper in het oppervlak van de galliumfosfideplaatjes, waardoor deze zwart verkleuren. Deze oppervlaklaag heeft een dikte van ongeveer 1 μm. Het is in deze eerste trap van de reactie van belang dat het GaP met het koper in aanraking komt. De donker gekleurde kristallen worden vervolgens in een geevacueerde ampul gedurende 24 uur op 900 °C gegloeid. Hierbij verdwijnt de zwarting en het materiaal krijgt weer ongeveer dezelfde kleur als in de ongedoteerde toestand. Op deze wijze kan men uit aanvankelijk *N*-geleidend GaP naar gelang van de voorbehandeling *N*-geleidend ofwel *P*-geleidend GaP verkrijgen.

Optische en elektrische eigenschappen van *P-N*-overgangen

Wegens zijn eerder vermelde betrekkelijk grote bandafstand van 2,25 eV is GaP ook een interessante stof om de elektrische en optische eigenschappen van *P-N*-overgangen te onderzoeken. Aangezien het onderzoek van de luminescentieverschijnselen, zoals reeds vermeld, een bij uitstek zuivere grondstof vereist, hebben we het hierboven beschreven galliumfosfide gebruikt voor de vervaardiging van diodes.

Van de bekende werkwijzen ter vervaardiging van *P-N*-overgangen leek in ons geval de legeringsmethode het meest geschikt. Hierbij moest echter rekening worden gehouden met het feit dat tijdens het legeren galliumfosfide in de legeringsmelt oplost en dat van de daarbij ontstane fosfor naar gelang van de reactietijd een meer of minder groot gedeelte zal ontwijken. Deze fosfor is bij de daarop volgende afkoeling niet meer beschikbaar voor de rekristallisatie van het galliumfosfide, zodat de rekristallisatielaag dunner uitvalt naarmate

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

men de legeringstijd langer kiest. Daar de fosfor zeer snel ontwijkt, moest een legeringsmethode worden toegepast waarbij de monsters snel verhit en weer afgekoeld worden. Voor het verhitten van het galliumfosfide gebruikten wij derhalve een elektrisch verhitte iridiumstrip, waarmee gemakkelijk legeringstijden in de orde van een seconde konden worden bereikt. Het ohmse contact bestaat uit een goud-zink-legering, terwijl ter verkrijging van een *P-N*-overgang tin wordt ingelegeerd. De op deze wijze gemaakte *P-N*-overgangen liggen in hoofdzaak evenwijdig aan het oppervlak. Men ziet duidelijk dat ondanks de korte legeringstijd slechts een zeer dunne rekristallisatielaag ontstaat (*fig. 3*). Bij deze *P-N*-overgangen heeft men te maken met zeer abrupte overgangen, zoals uit capaciteitsmetingen gebleken is. Zet men het kwadraat van de reciproke capaciteit van een *P-N*-overgang uit tegen de aangelegde spanning (*fig. 4*), dan moet dit bij abrupte overgangen een lineair verband te zien geven [1].

De elektrische eigenschappen van deze diodes worden voornamelijk bepaald door de relatief grote bandafstand [2]. Doordat het intrinsieke geleidingsvermogen zeer klein is, kan men van galliumfosfide diodes maken waarvan de keerstroom tot ca. 10 V minder dan 10^{-11} A bedraagt, in sommige gevallen zelfs minder dan 10^{-13} A. Door dezelfde oorzaak vindt men in de doorlaatrichting ook een logaritmisch verband tussen stroom en aangelegde spanning over vele orden van grootte (*fig. 5*), zodat men b.v. bij 1,4 V voor de verhouding tussen doorlaat- en keerstroom een waarde van 10^{11} krijgt.

Wordt een *P-N*-overgang in de doorlaatrichting geschakeld, dan worden, zoals men weet, minderheidsladingdragers in het *P*- resp. *N*-geleidende deel van de overgang geïnjecteerd, waar ze met de reeds aanwezige meerderheidsladingdragers kunnen recombineren. Deze recombinatie kan in het algemeen rechtstreeks door overgangen van band tot band plaatsvinden ofwel via tussengelegen niveaus in de verboden zone. Ten gevolge van de gegeven bandenstructuur en bijkomende oorzaken gebeurt echter bij galliumfosfide de recombinatie vrijwel uitsluitend via stoorcentra. De bij deze recombinatie vrijkomende energie wordt bij diodes gewoonlijk in de vorm van warmte aan het kristalrooster afgegeven. Door inbouwen van geschikte stoorcentra kan men echter ervoor zorgen dat de recombinatie-energie niet in de vorm van warmte doch als licht naar buiten wordt uitgestraald. Dit verschijnsel noemt men dan *P-N*-luminescentie ofwel injectieluminescentie.

De voornaamste moeilijkheid waarmee men te kampen heeft als men *P-N*-luminescentie in galliumfosfide

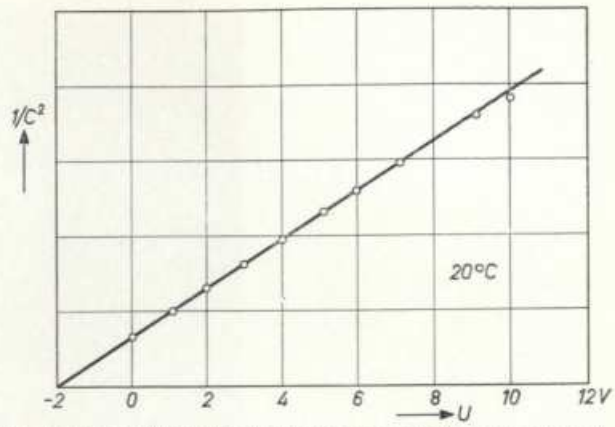


Fig. 4. Het kwadraat van de reciproke capaciteit C van een *P-N*-overgang in galliumfosfide als functie van de keerspanning U bij kamertemperatuur (ordinaat in willekeurige eenheden).

wil doen optreden, is dat men de stralingsloze recombinaties van de geïnjecteerde ladingdragers via de normaal altijd aanwezige doofcentra moet trachten te vermijden, d.w.z. recombinaties via stoorcentra waarbij de recombinatie-energie als warmte aan het kristalrooster wordt afgegeven. Dit hebben we bereikt, enerzijds door van zeer zuiver materiaal uit te gaan en anderzijds door de reeds vermelde dotering met zink en zuurstof. Zink en zuurstof vormen in galliumfosfide stoorcentra waarin de recombinatie der ladingdragers voornamelijk met de emissie van licht gepaard gaat. De aard van deze

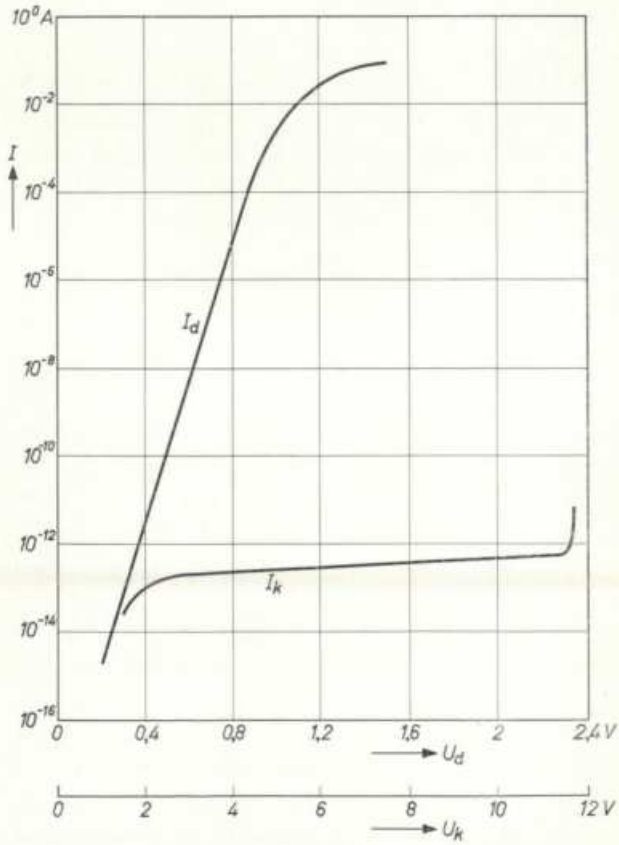


Fig. 5. Stroom-spanningskarakteristieken van een galliumfosfidediode. U_d spanning in doorlaatrichting, I_d doorlaatstroom, U_k spanning in keerrichting, I_k keerstroom.

[1] Zie b.v. R. A. Greiner, Semiconductor devices and applications, McGraw-Hill, New York 1961.
[2] C. T. Sah, R. N. Noyce en W. Shockley, Proc. IRE **45**, 1228, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stoorcentra is nog niet geheel opgehelderd. Voor het gemak beschouwen we ze als acceptors met een afstand van 0,45 eV van de valentieband. Verder is het essentieel dat het inlegeren van het tincontact zo snel mogelijk gebeurt. Op deze wijze kan men *P-N*-lichtbronnen verkrijgen waarvan het quantumrendement (verhouding van het aantal geëmitteerde quanta tot het aantal geïnjecteerde elektronen) voor het uitgestraalde licht in het beste geval ca. 1% bedraagt, hoewel ten gevolge van de grote brekingsindex van GaP ($n = 2{,}9$) zeer veel licht door meervoudige reflexie in het kristal verloren gaat [3]. Vergeleken met andere *P-N*-lichtbronnen, b.v. van GaAs, heeft galliumfosfide vooral het voordeel dat dit hoge quantumrendement niet slechts bij lage temperatuur doch ook bij kamertemperatuur kan worden bereikt. *Fig. 6* is een microfoto van de doorsnede van een GaP-monster met een luminescerende *P-N*-overgang.

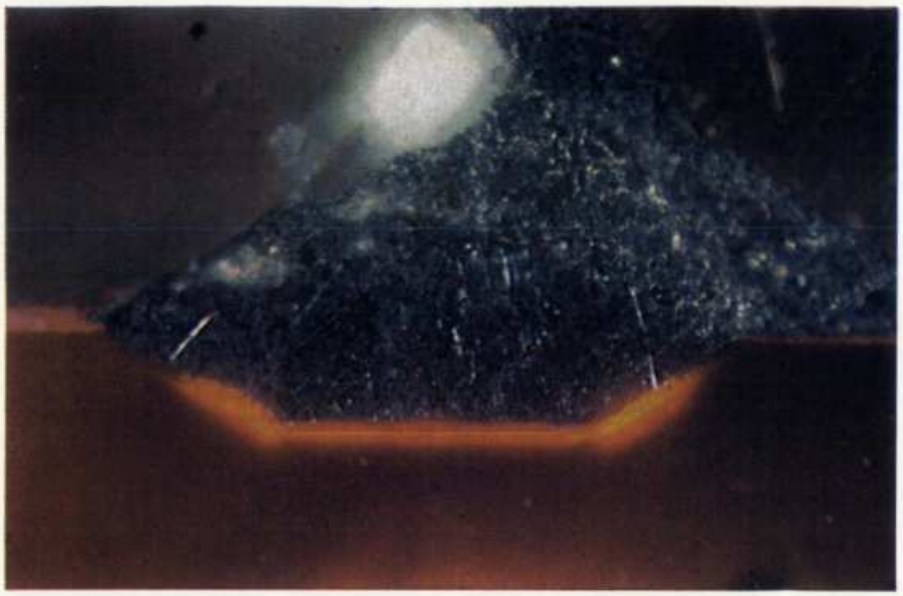


Fig. 6. Dezelfde *P-N*-overgang als in fig. 3, bij doorgang van een stroom van 10 mA in de doorlaatrichting. Optreden van *P-N*-luminescentie.

De bij de recombinatie der ladingdragers vrijkomende energie, die als straling wordt geëmitteerd, wordt bepaald door de afstand van het acceptorniveau tot de geleidingsband. In het geval van de hier gebruikte dotering met zink en zuurstof bedraagt deze afstand 1,8 eV, zodat men een emissie met een maximum bij 700 nm verkrijgt. Voor gebruik als lichtbron is echter zulk een langgolvige straling, gezien de geringe gevoeligheid van het oog voor dit deel van het spectrum, bepaaldelijk niet geschikt. Hiervoor is men veeleer geïnteresseerd in straling van kortere golflengte. Inderdaad kan men door alleen met zink te doteren ook een emissie bij ongeveer 565 nm verkrijgen, die dus reeds vrij dicht bij het maximum der spectrale gevoeligheid van het menselijk oog ligt. Daar echter de bandafstand van galliumfosfide bij ongeveer 550 nm (2,25 eV) ligt, betekent dit dat het zinkniveau dat de emissie veroorzaakt zeer dicht bij de valentieband gelegen is. Zulk een niveau is bij kamertemperatuur reeds in aanzienlijke mate geïoniseerd, zodat het voor een recombinatie met elektronen uit de geleidingsband geblokkeerd is. Dit verschijnsel noemt men de temperatuurdoving van de luminescentie. Een kortgolvige emissie met hoog rendement bij kamertemperatuur kan men dus om deze redenen in het gunstigste geval in het gele gebied van het spectrum verwachten.

De tijden waarin de luminescentie van een dergelijke *P-N*-lichtbron zijn maximum bereikt en uitsterft, hangen — als we afzien van het effect van het eventuele vangen van ladingdragers door „traps" — uitsluitend af van de levensduur der geïnjecteerde ladingdragers. Daar deze, zoals bekend, veel minder dan 1 microseconde kan bedragen, is de *P-N*-luminescentie de snelste elektrische lichtbron die men tot op heden kent. Hoewel GaP niet tot de snelste *P-N*-lichtbronnen behoort, kan men hiermede toch door geschikte dotering op betrekkelijk eenvoudige wijze lichtimpulsen met een duur van 10^{-6} à 10^{-7} seconde produceren. Deze korte aanloop- en uitsterftijden behoren tot de typische eigenschappen waardoor deze lichtbron zich onderscheidt van elektroluminescentie-cellen gebaseerd op het Destriau-effect, waarmee men in het algemeen geen kortere schakeltijden dan 10^{-3} seconde kan bereiken.

De omkering van de *P-N*-luminescentie, nl. het *P-N*-foto-effect, krijgt men door de *P-N*-overgangen met licht te bestralen. Een der belangrijkste voorwaarden voor het optreden van een fotostroom is dat er door een geschikte, hetzij thermische, hetzij optische, excitatie nabij de *P-N*-overgang zowel beweeglijke gaten als beweeglijke elektronen ontstaan, zoals b.v. gebeurt door de rechtstreekse excitatie van elektronen vanuit de valentieband naar de geleidingsband (fundamentele absorptie van het rooster). Is nl. slechts één soort ladingdragers beweeglijk, dan kunnen de door excitatie ontstane en wegens het elektrische veld in de *P-N*-overgang gescheiden elektron-gat-paren niet via de uitwendige keten worden geneutraliseerd en derhalve geen fotostroom teweegbrengen. In tegenstelling tot andere

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

halfgeleiders, zoals Ge, Si of GaAs, blijft echter de fotogevoeligheid van GaP geenszins beperkt tot die lichtenergiewaarden die beantwoorden aan de fundamentele absorptie van het rooster, doch zij strekt zich naar gelang van de dotering tot in het infrarode deel van het spectrum uit (*fig. 7*).

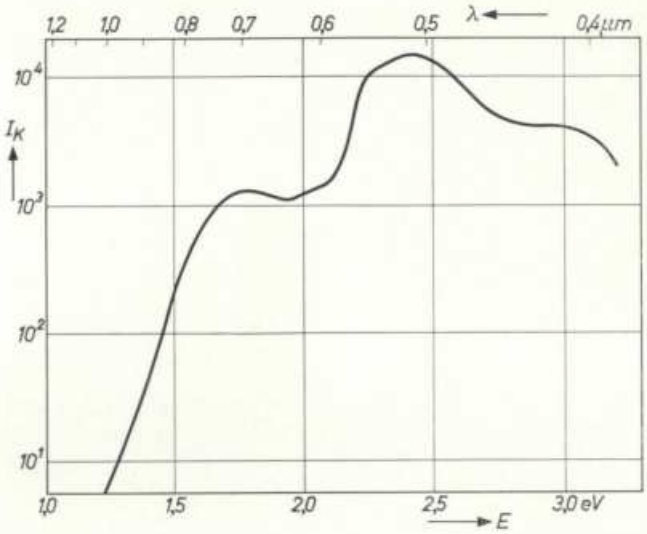


Fig. 7. Spectrale gevoeligheid (kortsluitstroom I_K in willekeurige eenheden) van een met zink en zuurstof gedoteerde galliumfosfide-*P-N*-fotodiode bij kamertemperatuur. *E* fotonenenergie.

De kortsluitstroom van een *P-N*-fotocel hangt zowel van de concentratie der gevormde elektron-gat-paren af als van de levensduur der door de excitatie ontstane minderheidsladingdragers. Hierdoor heeft men dus twee mogelijkheden om de kortsluitstroom te beïnvloeden.

Bij met zink en zuurstof gedoteerde GaP-fotocellen kan men met lichtenergieën kleiner dan de bandafstand, door middel van zg. tweetrapsprocessen, de b.v. door band-band-excitatie ontstane concentratie van elektron-gat-paren verder opvoeren. Men kan nl. door lichtquanta met een energie van ongeveer 1,8 eV, d.i. minder dan de bandafstand, elektronen uit het op 0,45 eV boven de valentieband gelegen acceptorniveau in de geleidingsband brengen (*fig. 8*), zodat beweeglijke elektronen ontstaan. Bestraalt men het kristal tegelijk met andere lichtquanta, waarvan de energie slechts meer dan 0,45 eV behoeft te bedragen, dan vult men de ledige acceptors weer met elektronen uit de valentieband en verkrijgt zodoende beweeglijke gaten. Dat de door twee absorptieprocessen ontstane elektron-gat-paren voor het foto-effect kunnen worden benut, is te danken aan het feit dat de voor vulling van de ledige acceptors nodige tijd korter is dan de levensduur der eerst aangeslagen elektronen, zodat na voltooiing van de tweede excitatietrap zowel beweeglijke gaten alsook beweeglijke elektronen extra beschikbaar komen. Deze GaP-fotocellen, die behalve het „normale" foto-effect binnen de fundamentele absorptie van het rooster tevens nog een gevoeligheid voor licht met energiewaarden kleiner dan de bandafstand bezitten, kunnen voor zonlicht in sommige gevallen een gemeten rendement bij kamertemperatuur hebben van ca. 3% (quotiënt van het aantal ontstane elektronen en het aantal ingestraalde quanta). Dit kan bij 80-90 °C tot 4-5% oplopen, aangezien de voor de donkergeleiding verantwoordelijke centra bij kamertemperatuur nog niet volledig geïoniseerd zijn. Gezien het feit dat in onze gelegeerde monsters de geometrische configuratie nog zeer ongunstig is, zou het mogelijk moeten zijn een nog beter rendement te bereiken, hetgeen speciaal van belang is omdat deze cellen onder bepaalde voorwaarden gevoelig zijn van het ultraviolet tot in het infrarood.

Terwijl men dus bij met zink en zuurstof gedoteerde GaP-fotocellen de „normale", door de fundamentele excitatie verkregen, kortsluitstroom kan opvoeren door tweetrapsprocessen, kan men bij met koper gedoteerde GaP-fotocellen de „normale" kortsluitstroom wijzigen door de levensduur der minderheidsladingdragers te veranderen. Deze fotocellen worden eerst in het spectrale gebied van de fundamentele absorptie van het rooster, b.v. met blauw licht, bestraald, waardoor een „normale" kortsluitstroom van de gebruikelijke waarde ontstaat. Door nu bovendien met infrarood te bestralen, krijgt men een gewijzigde bezetting van de recombinatiecentra binnen de verboden zone van het galliumfosfide. We hebben kunnen aantonen dat door de gewijzigde bezetting de levensduur der aangeslagen minderheidsladingdragers langer wordt indien het uitgangsmateriaal *N*-geleidend is, en dat de levensduur korter wordt indien het uitgangsmateriaal *P*-geleidend is. In het eerste geval krijgt men dus een vergroting, in het tweede geval een verkleining van de „normale" kortsluitstroom. Door combinatie met centra van an-

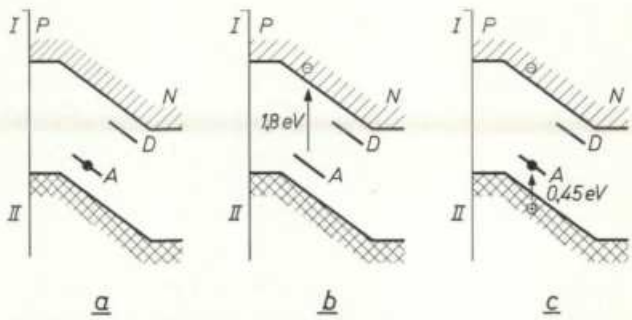


Fig. 8. Voorbeeld van een manier om een *P-N*-foto-effect teweeg te brengen met behulp van een lichtenergie kleiner dan de bandafstand. *a*) Grondtoestand, *b*) eerste excitatietrap, waardoor een vrij elektron ontstaat, *c*) tweede excitatietrap, waardoor een vrij gat ontstaat. *I* geleidingsband. *II* valentieband. *A* acceptorniveaus. *D* donorniveaus.

[3] H. G. Grimmeiss en H. Scholz, Physics Letters **8**, 233, 1964 (no. 4).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dere aard kan men speciaal in het geval van verkleining van de kortsluitstroom een verbazend hoge gevoeligheid voor het infrarood krijgen, die het mogelijk maakt infrarode straling van slechts 10^{-7} W bij golflengten tot ongeveer 2 μm nog aan te tonen.

Opto-elektronische toepassingen

Zowel de bovenvermelde *P-N*-lichtbronnen als de *P-N*-fotocellen zijn zeer geschikt voor opto-elektronische schakelingen. Het essentiële voordeel van opto-elektronische schakelingen boven de gebruikelijke elektronische is dat de signaaloverbrenging gedeeltelijk door licht geschiedt, zodat stroomkringen elektrisch gescheiden kunnen blijven en derhalve ongewenste elektrische koppelingen kunnen worden vermeden. Bovendien kan men bij gebruik van geïntegreerde schakelingen het geheel zeer compact maken. Weliswaar gaat bij de geïntegreerde schakelingen vaak het essentiële voordeel van de snelheid van *P-N*-lichtbronnen, vergeleken met andere lichtbronnen, teloor, daar men hierbij in het algemeen stralingsontvangers moet gebruiken waarvan de werking op fotogeleiding berust: gevoelige fotogeleiders zijn zeer traag, zodat de snelheid van het geheel niet wordt bepaald door de *P-N*-lichtbron doch door de stralingsontvanger. Voor meer geavanceerde opto-elektronische toepassingen van de *P-N*-lichtbron zou het derhalve nuttig zijn als men over een even snelle ontvanger (en wel bestaande uit een halfgeleiderelement) kon beschikken.

In combinatie met snelle ontvangers zoals b.v. fotomultiplicators kan men op betrekkelijk eenvoudige wijze elektrische signalen tot frequenties van enkele MHz overbrengen. Maar zelfs met fotogeleiders kan men, ondanks hun traagheid, interessante combinaties maken, aangezien een fotogeleider niet slechts een energieomzetter, doch tevens een buitengewoon efficiente versterker is. Reeds met in de handel verkrijgbare fotogeleiders kan men heden een vermogensversterking van 10^6 tot 10^7 bereiken, zodat men zelfs in combinatie met lichtbronnen van gering rendement tot een vermogensversterking komt die de moeite waard is.

Als voorbeeld hiervan is in *fig. 9* een opstelling weergegeven waarin het licht van een GaP-*P-N*-lichtbron valt op een CdS-fotogeleider. Door de belichting daalt de donkerweerstand van deze fotogeleider van ongeveer 10^{10} Ω tot ca. 1000 Ω. De *P-N*-lichtbron heeft hier boven andere lichtbronnen het voordeel dat hij slechts ca. 2 V gelijkspanning als voedingsspanning nodig heeft, vergeleken bij b.v. enige honderden volts wisselspanning voor een elektroluminescentie-cel gebaseerd op het Destriau-effect. Een dergelijke combinatie kan men dus als relais of als een soort transformator gebruiken.

Een ander voordeel van deze combinatie is dat de

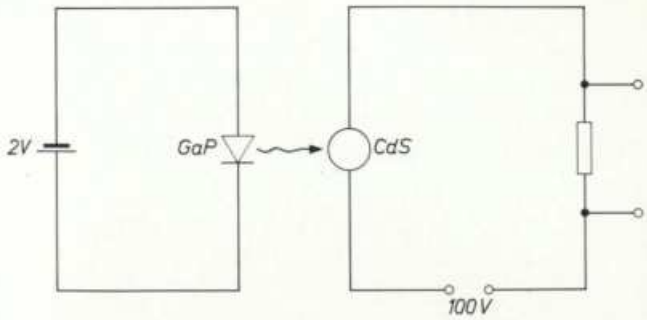


Fig. 9. Combinatie van een GaP-*P-N*-lichtbron en een CdS-fotogeleider als voorbeeld van een opto-elektronisch relais.

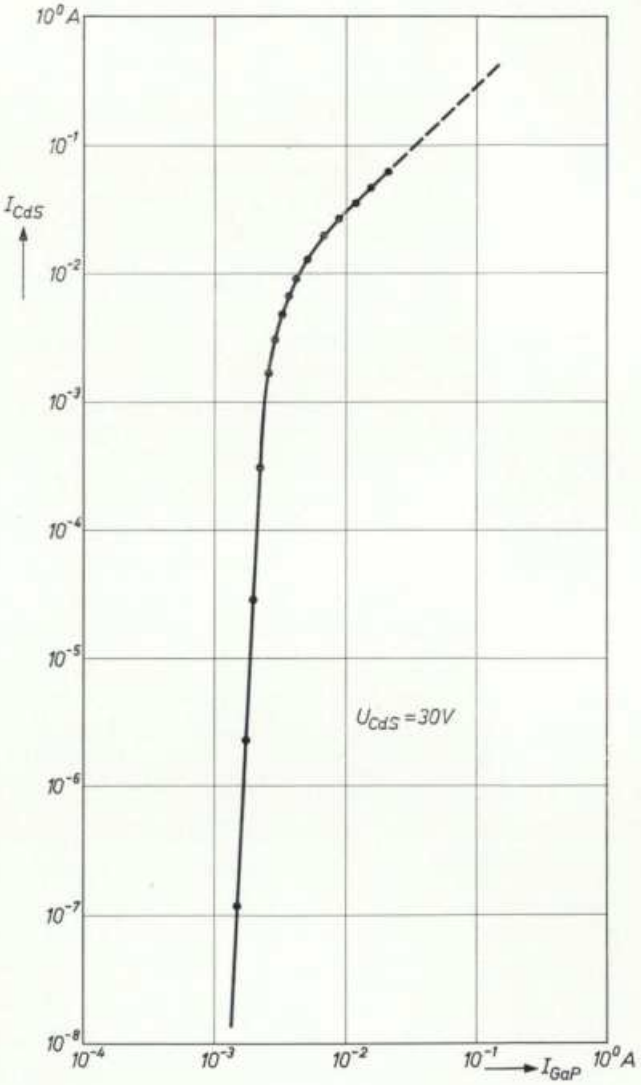


Fig. 10. Karakteristiek van de in fig. 9 weergegeven combinatie. De stroom in de fotogeleider-kring I_{CdS} is uitgezet tegen de stroom in de lichtbron-kring I_{GaP}.

constructie zeer klein kan worden gemaakt, daar de luminantie van de diodes groter is dan b.v. die van gloeilampen.

Voorts kan men dank zij het niet-lineaire gedrag van de *P-N*-luminescentie ten opzichte van stroom en spanning zeer steile karakteristieken krijgen (*fig. 10*), waarvan men speciaal voor schakeldoeleinden zeer

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

goed gebruik kan maken. Tevens blijkt uit de in fig. 10 weergegeven karakteristiek dat in dit experiment ondanks de ongunstige geometrische configuratie reeds een stroomversterking en vooral een vermogensversterking werd verkregen. Door verbetering van de geometrie zou het mogelijk moeten zijn de weerstand van de belichte fotogeleider nog een of twee orden van grootte verder te verminderen, hetgeen vooral voor toepassing in de telecommunicatietechniek van groot belang zou zijn.

Interessante opto-elektronische combinaties kan men ook verkrijgen bij gebruik van galliumfosfide-fotocellen. Bestraalt men b.v. een fotocel van met koper gedoteerd galliumfosfide met het groene licht van een met zink gedoteerde GaP-*P*-*N*-lichtbron (*fig. 11*), dan

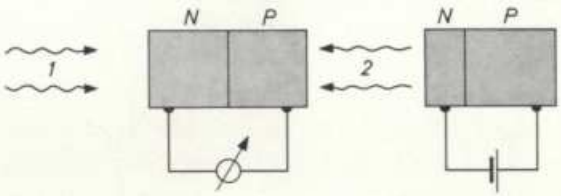


Fig. 11. Infrarooddetector van met koper gedoteerd galliumfosfide. *1* infrarode straling, *2* groen licht.

wekt men hiermede in de genoemde fotocel een „normale" kortsluitstroom op. Deze kortsluitstroom is — zoals reeds werd vermeld — zeer gevoelig voor infrarode straling, zodat een dergelijke combinatie als een zeer compacte infrarooddetector kan worden gebruikt. Een hierop berustende detector van nog compactere vorm krijgt men door in galliumfosfide dat met zink en zuurstof is gedoteerd, *twee P-N*-overgangen in te legeren (*fig. 12*). Schakelt men één hiervan in doorlaatrichting, dan veroorzaakt de daarbij optredende luminescentie bij 1,8 eV in de tweede *P-N*-overgang een

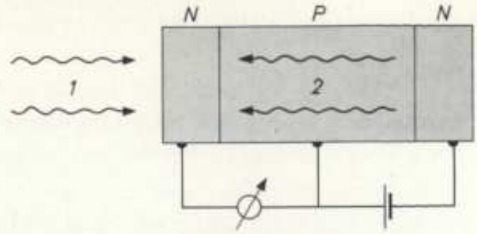


Fig. 12. Infrarooddetector van met zink en zuurstof gedoteerd galliumfosfide. *1* infrarode straling, *2* licht van 700 nm.

fotostroom. Daar deze echter versterkt wordt als er bovendien nog infrarode straling op de *P-N*-overgang valt, is zulk een combinatie eveneens geschikt als infrarooddetector.

Produceert men bij een combinatie volgens fig. 11 of ook volgens fig. 12 de te meten infrarode straling met behulp van een *P-N*-lichtbron, b.v. van GaAs of van met Cu gedoteerd GaP, dan krijgt men een soort triode. Het voordeel van zulk een triode boven een fototransistor („radistor") [4] is vooral dat de versterking van het element in hoofdzaak door de infrarode straling wordt gestuurd, d.w.z. door een straling die in het materiaal zelf slechts weinig wordt geabsorbeerd.

[4] Zie b.v. R. F. Rutz, Proc. IEEE **51**, 470, 1963.

Samenvatting. De bereiding en dotering van zeer zuiver kristallijn galliumfosfide worden beschreven. Bij dotering met zink en zuurstof kan men van dit materiaal injectielichtbronnen vervaardigen met een hoog quantumrendement bij kamertemperatuur (ca. 1%) en met zeer korte schakeltijden (10^{-6} s), alsook fotocellen die in het gehele zichtbare deel van het spectrum gevoelig zijn. Door galliumfosfide met koper te doteren, krijgt men fotocellen waarmee zeer zwakke straling op golflengten tot ca. 2 μm nog kan worden aangetoond. Tot besluit worden enige voorbeelden van opto-elektronische toepassingen van GaP-schakelelementen gegeven.

Kleine elektromotoren

R. Thees

621.313.13-181.4

Met kleine elektromotoren bedoelen wij hier motoren met een vermogen tot ongeveer 15 W, zoals b.v. worden gebruikt in band- en platenspelers en in huishoudelijke apparaten. Als energiebron hiervoor heeft men meestal het eenfaze-wisselspanningsnet of een gelijkspanning leverende batterij ter beschikking, zodat we ons hier tot deze beide spanningstypen willen beperken.

Dr. R. Thees is medewerker van het laboratorium Aken van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

De eisen die men aan een motor voor een gegeven vermogen stelt, worden ten dele door de energiebron bepaald. De op het wisselstroomnet werkende motor zal men zo klein mogelijk willen maken. Zijn rendement, waarvoor men als gevolg van deze eis in het algemeen geen erg hoge waarde zal kunnen bereiken, behoeft slechts zo hoog te zijn dat de verwarming door de dissipatie in de motorwikkeling, ook als de motor is ingebouwd, aan de veiligheidsvoorschriften beantwoordt. Voor een gelijkstroommotor met batterijvoe-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ding daarentegen is een zo hoog mogelijk rendement de belangrijkste eis.

Voor beide spanningsvormen geldt dat de motor zo geruisloos mogelijk moet lopen en dat hij de radio- en televisieontvangst niet mag storen. Stroomtoevoer aan roterende spoelen door middel van commutatoren moet derhalve worden vermeden. Hiermede komt men tevens tegemoet aan de eis dat de motor zo weinig mogelijk onderdelen moet bevatten die aan slijtage onderhevig zijn en onderhoud vereisen.

De beoogde toepassing van de motor bepaalt de vereiste stabiliteit van het momentele dan wel het gemiddelde toerental, bij de optredende fluctuaties in belasting en voedingsspanning. Bij huishoudelijke apparaten zijn variaties van het gemiddelde toerental in de orde van 10% aanvaardbaar, bij muziekweergevers mag de momentele snelheid van band of plaat ten hoogste met 0,06% variëren.

Met de nu volgende beschrijving van een synchrone wisselstroommotor, die evenzeer geschikt is voor muziekweergevers als voor huishoudelijke apparaten, willen wij aantonen welke mogelijkheden voor kleine elektromotoren worden geboden door het gebruik van moderne keramische permanente magneten.

Synchrone wisselstroommotoren

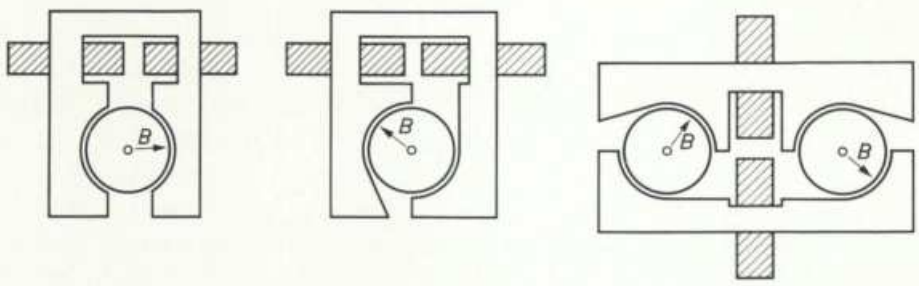
Wij beschouwen een motor als geschetst in *fig. 1a*. De rotor is gemaakt van een anisotroop keramisch materiaal (FX-D-300). Het is een massieve cilinder, met een voorkeursrichting die loodrecht op de as staat, en in zijn geheel gemagnetiseerd evenwijdig aan die voorkeursrichting. De stator bestaat uit gelamelleerd ijzerblik en draagt de spoel en de asondersteuningen. Een dergelijke motor is een synchrone motor. Deze levert alleen vermogen wanneer de rotor één omwenteling per spanningsperiode maakt, d.w.z. wanneer hij synchroon loopt met de netfrequentie. We beschouwen eerst het gedrag van de motor bij het synchrone toerental.

Zonder op de theorie van deze motoren in te gaan, kan men gemakkelijk laten zien welke voordelen het gebruik van keramische magneten voor de rotoren biedt. De reversibele permeabiliteit van de magneet is 1. Daardoor heeft de luchtspleet tussen magneet en stator slechts weinig invloed op het werkpunt van de magneet, zodat in vergelijking met andere motoren een betrekkelijk ruime luchtspleet kan worden gekozen. Laat men de motor als generator werken, dan is de in de spoel geïnduceerde spanning E zuiver sinusvormig, dank zij de evenwijdige magnetisatie van de rotor. Hieronder zullen wij zien dat dit essentieel is voor een hoog rendement. Bovendien brengt de geringe permeabiliteit van de rotor een hoge magnetische weerstand van de magnetische kring van de statorspoel met zich mee. Als gevolg hiervan kan men een betrekkelijk kleine fazehoek tussen de spoelstroom en de resulterende spanning op de spoel instellen. Ook dit is van essentieel belang om een klein volume en een hoog rendement te kunnen realiseren. De remanentie van het magnetische materiaal dient zo hoog mogelijk te zijn, daar het werkpunt van de magneet steeds dicht bij de remanentie ligt en het motorvolume, bij overigens gelijke eigenschappen, kleiner uitvalt naarmate de remanentie hoger is.

Met rotoren van ferroxdure kan men ook speciale vormen van motoren heel goed verwezenlijken. Fig. 1*c* toont als voorbeeld een motor met twee assen van gelijk vermogen. Dank zij de hoge magnetische weerstand van de in serie geschakelde magneetrotoren en de sterke onderlinge magnetische koppeling tussen de beide rotoren krijgt men een zeer efficiënte motor.

In *fig. 2* worden de hier besproken synchrone motoren wat betreft rendement, geleverd vermogen (ofwel koppel), gewicht en volume vergeleken met normale, in de handel zijnde, asynchrone motoren voor platenspelers (kromme *1*) en seriemotoren voor droogscheerapparaten (kromme *2*). Kromme *3a* laat zien welk vermogen en welk rendement onder bepaalde voorwaarden te bereiken zijn. Deze voorwaarden kunnen we afleiden door eerst na te gaan wat het maximale vermogen is dat een motor bij een gegeven netspanning U en een gegeven weerstand R van de statorspoel kan leveren. Door de formule voor het vermogen te differentiëren en het differentiaalquotiënt gelijk nul te stellen, krijgen we voor de fazehoek α van de stroom en de effectieve waarden van de spanningen de volgende betrekking:

$$\cos \alpha = \frac{U}{2E},$$



a b c

Fig. 1. Synchrone motoren met symmetrische (*a*) en asymmetrische (*b*) statorpolen, alsmede een twee-assige motor (*c*). *B* richting van de magnetisatie van de rotor.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

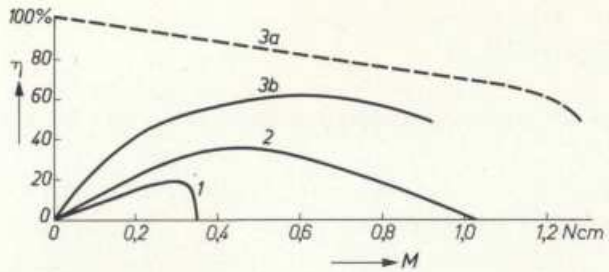


Fig. 2. Het rendement η als functie van het koppel M voor de volgende motoren:
Asynchrone motor, kromme *1*;
voedingsspanning 220 V, volume 126 cm³, gewicht 314 gram.
Seriemotor, kromme *2*;
voedingsspanning 220 V, volume 71,5 cm³, gewicht 152 gram.
Synchrone motor, krommen *3*;
3a is geldig onder de voorwaarden $U/2E = \cos\alpha$ en $E = U$;
3b is geldig voor een werkelijk geconstrueerde motor, met voedingsspanning 6,3 V, volume 32 cm³, gewicht 104 gram.

en voor het maximale geleverde vermogen:

$$P_{am} = \frac{U^2}{4R}.$$

Vragen wij ons voorts af wanneer de motor, onbelast of bij slechts zeer geringe belasting en met handhaving van bovengenoemde fazerelatie, zijn hoogste rendement heeft, dan komen wij tot de aanvullende voorwaarde:

$$E = U.$$

Wordt aan beide voorwaarden voldaan, dan krijgen we een verband tussen rendement en vermogen als door kromme *3a* wordt weergegeven. Dit houdt b.v. het volgende in: stemmen de geïnduceerde spanning E en de netspanning U in verloop en amplitude overeen, dan bedraagt bij nullast hun fazeverschil 180°. Er vloeit dan geen stroom en het opgenomen vermogen is nul. Het rendement van 100% treedt derhalve op als limietwaarde voor gering vermogen (klein koppel). Men dient natuurlijk niet uit het oog te verliezen dat hier sprake is van luchtspleetkoppels, en dat geen rekening is gehouden met verliezen, zoals wrijvingsverliezen in de lagers. Experimentele resultaten kloppen binnen de meetfouten met deze kromme. Kromme *3b* geldt voor een motor zoals voor platenspelers wordt gebruikt. Hierbij voldoet de dimensionering niet aan de bovenstaande voorwaarde, aangezien voor een uit het net gevoede motor een klein volume belangrijker is dan een hoog rendement. Zo is b.v. $E = 0{,}57\ U$. Het gebied tussen de krommen *3a* en *3b* bevat de mogelijkheden die men kan realiseren met een compromis tussen het volume, het rendement en — zoals uit het volgende zal blijken — het gedrag van de motor wat betreft het aanlopen.

Wanneer de geïnduceerde spanning dezelfde amplitude heeft als de netspanning, kan het aanlopen van de motor moeilijkheden geven. We moeten dit dus nader beschouwen.

Het aanlopen vindt plaats doordat de rotor al oscillerende het synchrone toerental bereikt. We moeten drie voorwaarden bij het aanlopen onderscheiden: 1) de rotor moet een draaitrilling gaan uitvoeren wanneer een spanning op de spoel wordt gezet, 2) de draaitrillingen van de rotor moeten een amplitude van ten minste 180° bereiken, d.w.z. een hoeksnelheid die beantwoordt aan het synchrone toerental, 3) bij nullast moet de motor, nadat hij het synchrone toerental heeft bereikt, stabiel lopen, d.w.z. de momentele hoeksnelheid mag fluctueren doch niet van teken veranderen. Aan elk van deze drie voorwaarden kan zijn voldaan zonder dat aan de beide andere voldaan is.

We beschouwen eerst een stator van de vorm als in fig. 1*a* is getekend. Wanneer de statorspoel niet wordt bekrachtigd, zoekt de rotor een zodanige stand ten opzichte van de statorpool op dat de magnetische flux door de statorspoel maximaal wordt. In elke andere hoekstand, behalve in twee labiele standen waarbij de flux minimaal is, werkt op de rotor een koppel — ook wel kleefkoppel genoemd — dat deze in de stand van de maximale magnetische flux tracht te draaien. De rotor heeft dus in de stator twee stabiele ruststanden.

Wordt de statorspoel met wisselspanning bekrachtigd, dan ontstaat een veld van constante richting, waarvan de amplitude sinusvormig varieert. Het veld van de spoel en de magnetische inductie van de rotor hebben dezelfde richting. Er werkt geen koppel op de rotor. Pas wanneer de rotor eenmaal uit zijn ruststand gedraaid wordt, b.v. door een stootje, wordt een draaitrilling opgewekt en in stand gehouden.

Dit wegdraaien uit de ruststand is echter onnodig indien men de volgende kunstgreep toepast. De magneet „ziet" slechts de werkelijke luchtspleet, de statorspoel evenwel „ziet" als luchtspleet de gehele rotor met zijn permeabiliteit 1. Kiest men derhalve een *asymmetrische vorm* van de stator, zoals getekend is in fig. 1*b*, dan hebben spoelveld en rotorinductie niet meer dezelfde richting. In zijn ruststand ondervindt nu de rotor reeds een koppel van het spoelveld. De asymmetrische statorspoel maakt dus het beginnen van een draaitrilling mogelijk.

Bij een symmetrische stator zoals die van fig. 1*a* zijn — indien aan alle voorwaarden voor aanlopen voldaan is — beide draairichtingen even waarschijnlijk. Bij een asymmetrische stator kan men ervoor zorgen dat er een voorkeur bestaat voor één bepaalde draairichting. Al naar gelang van de vorm van de stator, kan de waarschijnlijkheid hiervan waarden tot 90% bereiken, maar in de praktijk nimmer 100%. We komen nog op dit punt terug.

De draaitrilling wordt bepaald door het kleefkoppel en door het koppel dat het spoelveld op de magnetische rotor uitoefent (het ponderomotorische koppel). De

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

berekening van de draaitrilling als functie van de motorparameters is moeilijk. De ervaring met deze motoren heeft echter geleerd dat synchrone hoeksnelheden en amplitudes van 180° in de praktijk altijd bereikt worden.

Om de voorwaarden voor stabiel lopen bij nullast te begrijpen, moeten wij het momentele koppel van de motor nader beschouwen, d.w.z. het koppel als functie van de stand van de rotor. Het momentele koppel doorloopt tijdens een omwenteling twee cyclussen, we behoeven dus slechts een halve omwenteling te beschouwen. Men ziet in *fig. 3a* dat het uit het kleefkoppel en het ponderomotorische koppel samengestelde momen-

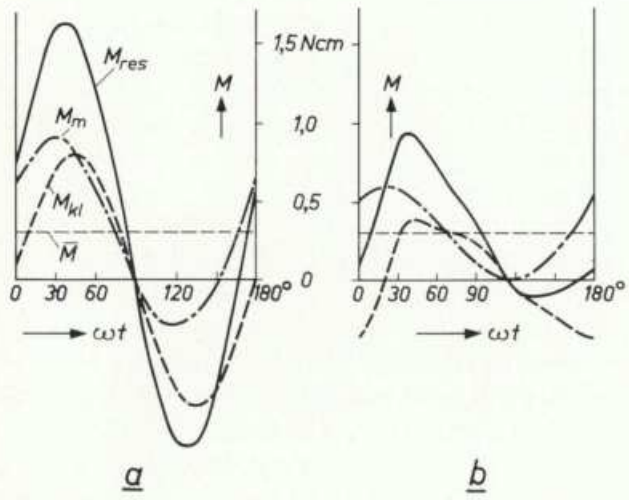


Fig. 3. Momentele en gemiddelde koppels voor een synchrone motor bij nullast, *a*) met onverzadigd en *b*) met verzadigd statorijzer. M_m ponderomotorisch koppel. M_{kl} kleefkoppel. M_{res} resulterend koppel. M gemiddeld koppel.

tele koppel gedurende bijna 80° van de 180° negatief is, d.w.z. tegengesteld aan de draairichting van de motor. In het algemeen is het traagheidsmoment van de rotor zo groot dat de motor binnen deze 80° niet van draairichting verandert. Door het krachtige remkoppel in dit hoekgebied wordt echter een aanzienlijke oscillatie van de hoeksnelheid om de gemiddelde waarde veroorzaakt. Deze oscillatie neemt gewoonlijk sterk in amplitude toe, zodat de motor, na enkele omwentelingen in een richting uitgevoerd te hebben, in de tegenovergestelde richting begint te lopen. De motor loopt dus wel aan, doch draait bij nullast niet stabiel.

Fig. 3*a* laat zien dat het kleefkoppel een aanzienlijke bijdrage levert tot de amplitude van het momentele koppel. Met een eenvoudige kunstgreep kan men nu dit kleefkoppel doen verdwijnen. De magnetische flux is $\Phi = \Phi_0 \sin \varphi$, waarbij φ de rotatiehoek voorstelt. Verdeelt men de rotor in twee gelijke helften (*fig. 4a*) en draait men deze 90° ten opzichte van elkaar, dan wordt de magnetische flux door het ijzer van de stator gegeven door:

$$\Phi = \tfrac{1}{2}\Phi_0 \{\sin \varphi + \sin (\varphi + 90°)\} = \frac{\Phi_0}{\sqrt{2}} \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right).$$

Deze flux is dus een factor $\sqrt{2}$ kleiner geworden. Het kleefkoppel van de ongedeelde rotor,

$$M = D \sin 2\varphi,$$

echter wordt door het verdraaien van de beide helften gelijk aan nul:

$$M = \frac{D}{2} \{\sin 2\varphi + \sin [2(\varphi + 90°)]\} \equiv 0.$$

Wil men axiale krachten op de rotor vermijden, dan verdeelt men de magneet in *drie* gedeelten, zoals in fig. 4*b* is getekend, en men draait het middelste gedeelte 90° ten opzichte van de beide buitenste gedeelten.

Ook zonder kleefkoppel blijft er nog een negatief stuk in het verloop van het koppel, zoals men in fig. 3*a* ziet. Wij hebben tot dusver ondersteld dat de magnetiseringskromme van het statorijzer binnen het werkgebied lineair is. Zorgen we nu door keuze van een voldoend kleine doorsnede van de stator ervoor dat het statorijzer reeds bij nullast in de verzadiging komt, dan ontstaat een geheel andere situatie. Fig. 3*b* laat zien dat in dit geval zowel het ponderomotorische koppel (berekend uit de gemeten stromen en spanningen) als het kleefkoppel aanzienlijk vervormd zijn. Het negatieve stuk van het ponderomotorische koppel is vrijwel nul geworden; het resulterende koppel heeft, zonder dat men de kunstgreep van fig. 4 behoeft toe te passen, een zo gering negatief stuk dat de motor bij nullast stabiel loopt. Weliswaar fluctueert het momentele koppel — en daarmede de hoeksnelheid — nog steeds ongeveer sinusvormig om de gemiddelde waarde, doch de amplitude van deze oscillatie is veel kleiner geworden. De motor loopt aanzienlijk rustiger.

Theoretisch en experimenteel blijkt dat de laagste

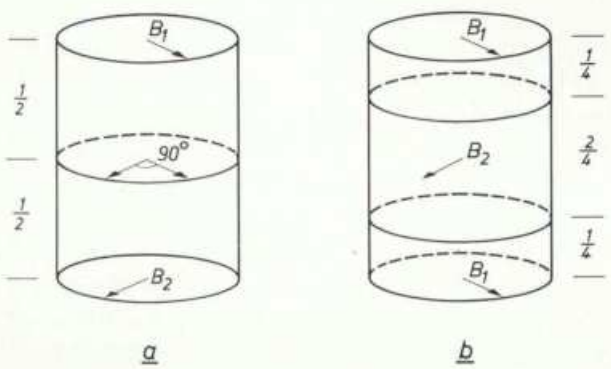


Fig. 4. In stukken verdeelde magnetische rotoren zonder kleefkoppel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

netspanning U waarbij de motor aanloopt en bij nullast stabiel draait, bij voldoende verzadiging van het statorijzer ongeveer gelijk is aan de geïnduceerde spanning E. In het algemeen zal U dus groter moeten zijn dan E, opdat netspanningsfluctuaties geen aanleiding tot aanloopmoeilijkheden kunnen geven. Wordt de motor belast, dan verandert de sliphoek, hetgeen betekent dat het veld van de spoel en de inductie van de rotor niet meer tegelijk hun maximum bereiken. De amplitude van het resulterende veld in het statorijzer wordt geringer. Er treedt geen verzadiging meer op, zodat de motor, wat betreft zijn gedrag bij belasting, niet door de voor een stabiele nullast-loop vereiste verzadiging van het statorijzer wordt beïnvloed.

Eist men één bepaalde draairichting (hetgeen b.v. voor droogscheerapparaten in principe niet hoeft), dan is een mechanische terugloopblokkering vrijwel altijd te verkiezen boven de toepassing van een draaiend statorveld (gespleten pool) of van een door de rotorpositie bepaalde sturing (commutatoren). Zulk een terugloopblokkering ondersteunt slechts de reeds aanwezige voorkeurdraairichting van de rotor en behoeft geen grote koppels op te vangen, is derhalve gemakkelijk te construeren.

Er zij nog op gewezen dat deze motoren slechts dan vanzelf aanlopen als de vast aan de rotor gekoppelde traagheidsmomenten niet te groot worden. Grote traagheidsmomenten moeten elastisch aan de rotoras gekoppeld worden. Met een dergelijke koppeling verkrijgt men ook gemakkelijk de constantheid van de momentele hoeksnelheid die b.v. voor band- en platenspelers vereist is. Omdat hun toerental niet van belasting en spanning afhangt en omdat zij geen storingen veroorzaken, zijn de hier beschreven motoren voor muziekweergevers bijzonder geschikt.

Gelijkstroommotoren

We gaan nu over tot de voeding uit een batterij, en we beschouwen eerst weer een motorconstructie als in fig. 1*b*. Vóór de statorspoel wordt een toestel geschakeld dat de gelijkspanning in een wisselspanning omzet. Een toestel dat een *sinusvormige* wisselspanning levert, is in principe mogelijk maar komt ten enenmale niet in aanmerking wegens het onvoldoende rendement. De spanningsomzetter moet dus een schakelaar zijn, en de aan de statorspoel toegevoerde spanning is dan in eerste benadering een kanteelspanning. Voor ons betoog doet het er weinig toe of dan twee batterijen van tegengestelde polariteit afwisselend op één spoel worden aangesloten of één batterij afwisselend op twee in tegengestelde zin gewikkelde spoelen.

Evenals bij synchrone motoren moet ook hier de geïnduceerde spanning in verloop en amplitude overeenstemmen met de aangelegde spanning. Een zg. *radiaal* gemagnetiseerde rotor induceert in de spoel een trapeziumvormige spanning, die echter in de praktijk een kanteelspanning zeer goed benadert. Een dergelijke magnetisatie kan men bereiken met magneten van isotroop keramisch materiaal, doch de lage remanentie hiervan maakt een groter volume noodzakelijk. Suspensies van anisotrope ferrieten in kunststoffen (plastoferrieten) kunnen hier wellicht nieuwe mogelijkheden scheppen. Rekent men alleen met de motor, zonder omzetter, dan komt men met deze motoren dicht bij de rendementswaarden volgens kromme *3a* in fig. 2.

Wordt de spoelstroom geschakeld door een commutator, dan vervallen de problemen van het aanlopen en men krijgt een rendement dat het gebruik van deze motor, ondanks de bekende nadelen van de commutator, aantrekkelijk kan maken. Het totale rendement wordt echter nadelig beïnvloed door de borstelverliezen, die vooral bij kleine motoren relatief belangrijk zijn.

Voedt men de motor via een kanteelspanningsgenerator met transistors, dan verkrijgt men een totaal rendement dat altijd nog hoger ligt dan de maximale waarde van 55% die heden met gelijkstroommotoren van deze grootte kan worden bereikt. De stabiliteit van het toerental hangt af van de mate waarin de kanteelspanningsgenerator vrij is van terugkoppeling, en van de stabiliteit van diens eigen frequentie. Alle overige eigenschappen komen overeen met die der bovenbeschreven synchrone motoren.

Eenvoudige schakelingen krijgt men als men onderdelen van de motor tevens als onderdelen van de voorgeschakelde spanningsomzetter laat fungeren. Zo kan b.v. de statorspoel tevens als oscillatorspoel van de omzetter dienen. De stabilisatie van het toerental geeft dan speciale problemen.

Het toerental van een motor met commutator kan men b.v. stabiliseren door in de stroomkring, in serie met de commutator, een thyristor op te nemen. Deze thyristor wordt met een bepaalde constante frequentie ontstoken en door de commutator in een bepaalde stand gedoofd. Is de verhouding tussen de ontsteekfrequentie en de rotatiefrequentie van de rotor een bepaald geheel getal, dan veroorzaakt een verandering in belasting door een tijdelijke verandering van de hoeksnelheid een verschuiving van het ontsteektijdstip met betrekking tot de commutatie, zodat bij hetzelfde gemiddelde toerental een ander vermogen wordt geleverd. De shuntmotor is hierdoor voor bepaalde toerentallen gesynchroniseerd en bezit bij die toerentallen alle eigenschappen van een synchrone motor. De mogelijke verandering in belasting waarbij de motor nog synchroon blijft lopen, kan voor de verschillende toerentallen zeer uiteenlopen. Het breedste en meest stabiele werkingsgebied krijgt men indien de thyristor tweemaal per omwenteling wordt ontstoken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De reeds opgedane ervaringen doen verwachten dat keramische magnetische rotoren voor gelijkstroommotoren dezelfde voordelen zullen opleveren als voor wisselstroommotoren.

Meetmethodes

Hoewel we hier moeten afzien van een gedetailleerde weergave van meetresultaten, willen wij toch in het kort de gebruikte meetmethodes beschrijven.

Het gemiddelde geleverde vermogen werd gemeten met behulp van een wervelstroom-rembalans op meslagers. De gevoeligheid in het laagste meetgebied bedroeg 10^{-4} Nm per schaaldeel. Voor een synchrone motor met een afgegeven vermogen van 2 W bleek de meting nauwkeurig binnen $\pm$ 1%. Het momentele geleverde vermogen werd via een inductieve opnemer op het scherm van een oscilloscoop weergegeven. Deze metingen zijn echter moeilijk uit te voeren en niet bijzonder nauwkeurig.

Het opgenomen vermogen werd gemeten met een wattmeter met Hall-multiplicator. Voor deze metingen is een instrument ontwikkeld waarbij door relais automatisch uit vier spannings- en vier stroommeetgebieden wordt gekozen, waardoor er zeven vermogensgebieden zijn. In het laagste vermogensgebied bedraagt de afleesnauwkeurigheid 0,015 W, en voor 2 W opgenomen vermogen bereikt men een meetnauwkeurigheid van $\pm$ 2%.

Momentele hoeksnelheden werden gemeten met een unipolaire generator. Het traagheidsmoment van de roterende delen van de generator is zo klein dat het kan worden verwaarloosd ten opzichte van het traagheidsmoment van de rotor. De in combinatie met een oscilloscoop bereikte gevoeligheid bedraagt 2 omw/min. Voor langzame, met een penschrijver geregistreerde snelheidsveranderingen kan men een scheidend vermogen van 0,1 omw/min bereiken. Met de millivoltmeter kan men gemiddelde waarden tot ongeveer 0,04 omw/min meten. Om deze grenswaarden te bereiken, heeft men echter een nogal omvangrijke installatie nodig voor het stabiliseren van het magnetische veld en, in geval van kleine toerentalfluctuaties rondom een hoog gemiddeld toerental, ook voor het compenseren van de gelijkspanningscomponent. Met een digitale telling van het gemiddelde toerental daarentegen kan men zonder moeite een gevoeligheid van 0,01 omw/min in elk gebied van toerentallen bereiken.

Samenvatting. Beschrijving van de eigenschappen van kleine motoren met permanentmagnetische rotor van keramisch magnetisch materiaal. De voorwaarden voor het vanzelf aanlopen en voor het stabiel lopen bij nullast van éénfaze-wisselspanningsmotoren worden besproken, en er wordt getoond hoe men bij motoren met een hoog rendement of met een klein volume aan deze voorwaarden kan voldoen. Bij gelijkspanningsmotoren kan men de dimensionering zodanig wijzigen dat men hiervan soortgelijke eigenschappen mag verwachten.

Problemen en ontwikkelingstendensen van de randapparatuur bij informatieverwerking

G. Haas

681.14

Het hart van een informatieverwerkende installatie is het centrale rekenorgaan, en dit kunnen wij ons, om de zaak aanschouwelijk voor te stellen, inderdaad als middelpunt van de installatie denken. Daaromheen geschaard zien wij dan een verscheidenheid van apparaten die we zullen samenvatten onder het begrip randapparatuur; een deel hiervan verzorgt de communicatie tussen het centrale rekenorgaan en de buitenwereld, een ander gedeelte vervult supplementaire taken zoals b.v. het bewaren van grote hoeveelheden informatie.

Tegenwoordig is er bij het gebruik van een informatieverwerkende installatie meestal een directe samenwerking tussen mens en machine. De te verwerken gegevens moeten daarom eerst uit de door de mens gebruikte vorm worden gebracht in een vorm waarmee de machine kan werken. Deze aanpassing vindt plaats in de invoerapparaten, waarbij de gegevens tegenwoordig meestal, voordat ze aan de machine worden toegevoerd, eerst nog op een andere informatiedrager (b.v. ponskaart of ponsband) worden vastgelegd. Het omgekeerde probleem treedt op bij de uitvoer; door het toepassen van een drukinrichting of van optische indicatie is dit reeds lang opgelost.

Behalve de systemen voor procesregeling, die we in dit artikel buiten beschouwing laten, bestaan er twee hoofdgebieden voor de toepassing van elektronische rekenmachines, en wel enerzijds het oplossen van technisch-wetenschappelijke vraagstukken, anderzijds het

Dr. G. Haas is medewerker van het laboratorium Hamburg van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

verwerken van gegevens voor commerciële doeleinden. Het onderscheid tussen deze gebieden komt dikwijls tot uiting in de verhouding tussen de voor een bepaalde opdracht vereiste hoeveelheid bewerkingen door het centrale rekenorgaan en de stroom van informatie die wordt in- en uitgevoerd. Technisch-wetenschappelijke opdrachten worden vaak gekenmerkt doordat er aan de machine slechts weinig gegevens worden toegevoerd, waarmee veel rekenwerk wordt verricht, terwijl het resultaat naar verhouding weer weinig gegevens bevat. Bij de meeste commerciële machines is het omgekeerd: er worden grote hoeveelheden gegevens in- en uitgevoerd, die echter in het centrale rekenorgaan eenvoudige bewerkingen ondergaan. Het is duidelijk dat in het eerste geval aan het centrale rekenorgaan hogere eisen gesteld dienen te worden dan aan de in- en uitvoerapparaten. In het tweede geval hangt de verwerkingssnelheid meestal af van de randapparatuur. Pas wanneer het centrale rekenorgaan voor een groot aantal randapparaten of filialen wordt ingezet, dient men ook bij commerciële informatieverwerking hogere eisen aan het rekenorgaan te stellen.

De eenvoudigste *invoerorganen* maken gebruik van een toetsenbord, b.v. van een schrijfmachine, boekhoudmachine of kassiersmachine. Ponsbandlezers lezen de gegevens die elders op ponsband zijn gezet en leveren deze veelal af aan het werkgeheugen van het centrale rekenorgaan. Voor ponskaartlezers geldt hetzelfde. De veelal overbodige omweg van de geschreven of gedrukte gegevens via ponsband of ponskaarten wordt vermeden bij het gebruik van leesmachines, die tegenwoordig reeds in staat zijn gedrukte tekst te lezen en onmiddellijk in het centrale rekenorgaan in te voeren. Ten slotte kan ook een telex- of telefoonkanaal dienen als invoerorgaan ten einde elders (b.v. in een filiaal) verkregen gegevens onmiddellijk aan de installatie toe te voeren.

De *uitvoerorganen* leveren het resultaat van de informatieverwerking af in leesbare vorm op papier (schrijfmachine, tabelleermachine, snelle regeldrukker), of in de vorm van ponsband (bandponser) of ponskaarten (kaartponser). Ten slotte kan het resultaat ook onmiddellijk, b.v. via een telefoonlijn, naar een filiaal of naar een andere informatieverwerkende installatie worden doorgegeven.

Behalve de in- en uitvoerorganen en een aantal hulpapparaten voor het behandelen van ponskaarten (zoals sorteermachines, tussen- en uitsorteermachines en reproduceermachines) zijn de grote langzame geheugens de belangrijkste randapparaten. Deze geheugens onderscheiden zich van het werkgeheugen in het centrale rekenorgaan door hun veel grotere capaciteit (b.v. 10^8 tekens), die echter slechts ten koste van een langere opzoektijd (b.v. 100 tot 1000 ms) te verwezenlijken is. Tot deze groep behoren de geheugens met magnetische band en de grote „random-access"-geheugens, zoals geheugens met magnetische trommels, schijven of kaarten (in feite vormt de ponskaartsorteermachine eveneens een groot geheugen met iedere gewenste capaciteit, doch zeer lange opzoektijd).

Kenmerken van de randapparaten

De informatiedragers

De belangrijkste informatiedragers voor de randorganen zijn papier of karton en magnetische lagen. Daarnaast worden ook, en in het bijzonder voor grote geheugens, fotografische of thermoplastische lagen gebruikt. Papier dient als ondergrond voor geschreven en gedrukte informatie of draagt de informatie in de vorm van ponsgaten in een band of kaart. Magnetische lagen worden op grote schaal op banden, trommels, schijven of kaarten als geheugen voor zeer grote hoeveelheden informatie gebruikt. Daarnaast worden ze ook toegepast op bepaalde documenten als extra informatiedrager, die gemakkelijk machinaal uitleesbaar is (b.v. op rekening-courantkaarten voor de automatische boeking van het saldo).

De ponsband [1] is de goedkoopste informatiedrager (kosten ca. fl. 5,— per 100 000 tekens) en de ponsbandlezer is het eenvoudigste machinale invoerorgaan voor rekeninstallaties; de ponsband wordt dan ook veelvuldig toegepast voor rekenprogramma's en subroutines bij technisch-wetenschappelijk werk. Een ander voordeel waardoor ponsband meer en meer ook bij de administratieve informatieverwerking wordt gebruikt, is dat het ponsen van de gegevens in de band eenvoudig en goedkoop werk is. Daarom is ponsband uitermate geschikt voor gedecentraliseerde informatieverwerkende installaties: op verschillende plaatsen kan men met eenvoudige apparaten ponsbanden maken, die betrekkelijk snel in de grote centrale installatie kunnen worden ingevoerd. Overal waar een oorpronkelijk document met een schrijfmachine wordt opgesteld, kan de band tegelijkertijd automatisch worden meegeponst als men de schrijfmachine koppelt aan een bandponsmachine (zoals b.v. gebeurt bij de „Flexowriter"). De ponsband maakt op deze wijze in zekere zin een directe invoer van de gegevens mogelijk. Een ander voordeel van de ponsband is de grote dichtheid waarmee de gegevens worden opgeslagen, namelijk ongeveer 1200 bits/cm³. De ponsband wint tevens aan betekenis bij de informatieoverdracht over een telefoonlijn, enerzijds dank zij de geringe kosten van de band, en anderzijds omdat de maximale transmissiesnelheid van onge-

[1] W. Eicken, H. K. Schuff, W. Henning, H. Pärli en K. Gautzsch, Der Lochstreifen in informationsverarbeitenden Systemen, Elektron. Datenverarb. Beiheft 4, 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

veer 300 tekens/s van een telefoonlijn aan de snelheid van de moderne snelponsers is aangepast. Ponsbanden hebben als nadeel dat ze niet sorteerbaar zijn, dat hun geringe snelheid de uitvoer uit grote installaties vertraagt, en ten slotte het feit dat eenmaal opgenomen informatie niet uitwisbaar is.

De belangrijkste informatiedrager is tegenwoordig wel de ponskaart. Deze dankt zijn veelvuldige toepassing aan de lage prijs (ca. fl. 1.— per 10 000 tekens), aan de gemakkelijke sorteerbaarheid, doch vooral aan de omstandigheid dat ponskaarten reeds tientallen jaren voor de mechanisatie van kantoor- en administratief werk worden gebruikt. Toen men in de vijftiger jaren elektronische rekenmachines ook voor commerciële doeleinden begon te gebruiken, dienden deze meestal ter completering en als hulpapparaten van bestaande ponskaartenafdelingen (zoals b.v. de elektronische kaartponser IBM 604). Naarmate de elektronische rekenmachines verder werden geperfectioneerd, ontwikkelden zij zich op den duur tot gelijkwaardige partners van de ponskaartinstallaties en ontstond de situatie die we in de tegenwoordige „commerciële informatieverwerking" kennen. Zo is b.v. het grote succes van informatieverwerkende installaties als de IBM 1401 voor een belangrijk deel toe te schrijven aan deze vruchtbare symbiose van de ponskaart met de elektronica. De ponskaart zal dan ook vermoedelijk nog lange tijd zijn waarde blijven behouden. Als nadelen van de ponskaart moeten we noemen dat deze mechanisch nogal kwetsbaar is, een tamelijk lange verwerkingstijd vereist, en dat, evenals bij de ponsband, eenmaal opgenomen gegevens niet uitwisbaar zijn.

Magnetische lagen zijn gekenmerkt door hun grote geheugencapaciteit per oppervlakte-eenheid. Mechanische slijtage ondergaan ze niet (bij geheugens met magnetische trommels of schijven) of nauwelijks (bij geheugens met magnetische band of kaarten), en ze kunnen een onbeperkt aantal malen schoongewist en opnieuw beschreven worden. De capaciteit van geheugens met magnetische lagen kan zeer groot zijn, en indien het geheugenmedium uitwisselbaar is, zoals bij geheugens met magnetische band, magnetische kaarten en sommige met magnetische schijven, zelfs onbeperkt groot. Hun verwerkingssnelheid is aanzienlijk groter dan die van ponsband of ponskaarten.

De opzoektijd

Een belangrijke eigenschap van geheugens is hun opzoektijd. Dit is, zoals bekend, de tijd die verloopt tussen het oproepen van een adres en het moment dat dit adres voor inschrijven of uitlezen van informatie beschikbaar is. De opzoektijd is in het algemeen langer bij grotere geheugencapaciteit. De mate waarin dit het geval is, hangt af van de keuze van het geheugensysteem en van de kosten besteed aan het elektronische gedeelte hiervan.

De trommelgeheugens die oorspronkelijk als werkgeheugens voor het centrale rekenorgaan werden gebruikt, bezaten één of meerdere koppen voor elk spoor, waarbij voor elke kop elektronische schakelingen voor versterking en selectie nodig waren. Geheugens met een voldoend grote capaciteit om ze tot de „grote geheugens" te mogen rekenen (10^8 tot 10^{10} bits) zouden op deze wijze een onbetaalbaar bedrag aan elektronische elementen vereisen. Wil men een grote geheugencapaciteit met een dragelijk aantal elektronische elementen verwezenlijken, dan dient men ofwel het aantal sporen te verminderen, ofwel elke kop voor een groot aantal sporen te gebruiken. Beide oplossingen leiden onvermijdelijk tot een langere opzoektijd.

Vermindering van het aantal sporen werd aanvankelijk verkregen door toepassing van magnetische band en later met magnetische kaarten: bij beide typen geheugens worden b.v. 8 sporen langs 8 vast opgestelde koppen gevoerd. Wil men een grote geheugencapaciteit realiseren met het gebruik van slechts een gering aantal koppen, dan dient men een zeer grote spoorlengte te gebruiken. Terwijl dit bij magnetische band tot aanzienlijke wachttijden leidde (b.v. 100 s), gelukte het bij geheugens met magnetische kaarten de wachttijd tot ongeveer 0,2 s te bekorten door de band als het ware in stukken te snijden en op te stapelen. De tweede oplossing, het vermeerderen van het aantal sporen per kop, vereist behalve een verplaatsing van de magnetische laag tevens een verplaatsing van de schrijf- en leeskop, zoals dit b.v. bij geheugens met magnetische schijven of grote trommelgeheugens gebruikelijk is.

Bij alle genoemde geheugens is de gemiddelde opzoektijd t_z gelijk aan de halve looptijd $t_s/2$ van het spoor vermeerderd met de gemiddelde tijd t_k nodig om de kop op het juiste spoor in te stellen:

$$t_z = \frac{t_s}{2} + t_k .$$

Bij het bandgeheugen b.v. is $t_k = 0$, zodat de gemiddelde opzoektijd gelijk is aan de halve looptijd van de band. Hetzelfde geldt voor trommelgeheugens met één kop voor elk spoor. Bij schijfgeheugens en trommelgeheugens met minder koppen dan sporen wordt de opzoektijd bepaald door de halve omlooptijd van plaat of trommel en de gemiddelde insteltijd van de kop op het gewenste spoor. Zoals reeds werd gezegd, hangt de opzoektijd af van de geheugencapaciteit en van het aantal schrijf- en leeskanalen. Een groot geheugen kan men derhalve, beter dan door zijn opzoektijd alleen, karakteriseren door de geheugencapaciteit te delen door de opzoektijd en door het aantal schrijf- en leeskanalen. Deze verhouding geeft dan de hoeveelheid

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

informatie aan, die per seconde en per schrijf- en leeskanaal opgenomen of afgegeven kan worden.

De informatiestroom

Een ander belangrijk kenmerk van randapparaten is hun informatiestroom uitgedrukt in tekens per seconde. De waarden hiervan kunnen voor diverse apparaten verscheidene orden van grootte verschillen. Het traagste invoermechanisme is het toetsenbord, met ongeveer 10 tot 15 tekens/s, terwijl bij schijf- en trommelgeheugens snelheden tot ongeveer 10^6 tekens/s worden bereikt. *Tabel I* geeft een overzicht van de huidige maximale verwerkingssnelheden in tekens per seconde van de verschillende randapparaten, gerangschikt van lage naar hoge snelheid.

Tabel I. Maximale verwerkingssnelheid (in tekens per seconde) bereikbaar met verschillende randapparaten voor elektronische informatieverwerkende installaties.

Toetsenbord	15
Bandponser	300
Kaartenponser	800
Ponsbandlezer	1 800
Leesmachine	2 000
Mechanische sneldrukker	2 500
Ponskaartenlezer	3 000
Elektrografische sneldrukker	60 000
Magneetbandapparaat	150 000
Schijfgeheugen	1 000 000
Trommelgeheugen	1 000 000
Datatransmissie	2 000 000

Ontwikkelingstendensen

De ontwikkeling van de verschillende randapparaten gaat nog steeds voort; daarnaast worden de ontwikkelingstendensen in dit gebied bepaald door:

a) bestudering van het *gebruik* van elektronische informatieverwerkende installaties,
b) het toepassen van stuurorganen die de informatiestroom tussen het centrale rekenorgaan en de randapparaten besturen,
c) het vastleggen van een „universeel verdeelpunt" tussen het centrale rekenorgaan en de randapparaten.

Gedecentraliseerde informatieverwerking

Het eerste decennium van de elektronische informatieverwerking heeft een geweldige vooruitgang van de schakeltechniek en van de geheugentechniek te zien gegeven. De technische vooruitgang van de reken-installaties heeft zich sneller voltrokken dan de ontwikkeling van het inzicht in een zinvolle toepassing, ook in de administratieve sector. De laatste jaren is men beter gaan beseffen dat het ontwerpen en bouwen van steeds nieuwere en snellere machines op zichzelf nog geen oplossing is. Voor een verdere verbreiding van elektronische informatieverwerking dient men veeleer de problemen die bij het toepassen optreden grondig te bestuderen. Het is hiervoor van groot belang dat men juist die processen signaleert en onderzoekt waarbij een voortdurende stroom van informatie optreedt. Hierbij blijkt dat het in vele gevallen doelmatiger is om één centrale installatie te laten samenwerken met veel verschillende filialen waar de informatie wordt verkregen — dit in tegenstelling tot het streven naar algehele centralisatie uit de beginjaren van de informatieverwerking. Dit streven naar informatieverwerking op afstand schept nieuwe problemen op het gebied van de gedecentraliseerde in- en uitvoerorganen, de externe controle op fouten en het transport van gegevens (datatransmissie). Evenals men thans door middel van de kiesschijf via de telefooncentrale een spreekverbinding tot stand brengt, zo zal het ook weldra mogelijk zijn over grote afstanden door middel van een toetsenbord aan een centrale informatieverwerkende installatie vragen te stellen of rekenopdrachten te geven en hierop het antwoord of de uitkomst terug te ontvangen [2].

Het „universele verdeelpunt"

Het toepassingsgebied van een informatieverwerkende installatie wordt in aanzienlijke mate bepaald door de flexibiliteit waarmee het centrale rekenorgaan aan een groot aantal en een grote verscheidenheid van randapparaten kan worden gekoppeld. Moderne reken-installaties hebben hiervoor een groot aantal aansluitkanalen, waaronder ook voor datatransmissie (b.v. Siemens 3003, UNIVAC 490 en het IBM-systeem/360). Het is van belang dat de afzonderlijke aansluitkanalen in hoge mate onafhankelijk van elkaar kunnen werken en het moet mogelijk zijn een aantal programma's gelijktijdig te verwerken in een optimale verdeling over de verschillende organen. Bij dergelijke informatieverwerkende installaties is de besturing van de stroom gegevens tussen het centrale rekenorgaan en de randapparaten zeer belangrijk. De laatste tijd is het onderzoek dan ook gericht op de ontwikkeling van de hiervoor geschikte stuurorganen [3,4] en op het instellen van een „universeel verdeelpunt" tussen het centrale rekenorgaan en de randapparaten [5].

Zulk een verdeelpunt heeft tot taak een uniform aansluitsysteem tussen de verschillende randapparaten en het centrale rekenorgaan mogelijk te maken opdat elk apparaat aan elk centraal rekenorgaan gekoppeld kan worden. Wanneer r centrale rekenorganen met p rand-

[2] J. M. Unk, Isys-Memorandum 62-M7, interne mededeling van N.V. Informatiesystemen, Den Haag.
[3] J. W. L. Jones, Input/output control systems, Joint Comp. Conf. Edinburgh 1964.
[4] A. W. Nicholson, Peripheral transfer system for a fast computer, Proc. IEE **111**, 15-26, 1964 (no. 1).
[5] IEC-Document 53A (Sekretariaat) 2, sept. 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

apparaten gecombineerd moeten kunnen worden via een universeel verdeelpunt, dan moeten aan de zijde van de rekenorganen maximaal r en aan de zijde van de randapparatuur maximaal p aanpassingsschakelingen aanwezig zijn.

Voor het instellen van een universeel verdeelpunt is het een eerste vereiste dat men de signalen die er over moeten lopen, grondig onderzoekt. Er blijkt een grote overeenkomst te bestaan tussen de stuursignalen waarmee de diverse randapparaten werken. De verschillen tussen de apparaten betreffen veeleer het vereiste *aantal* stuursignalen en de snelheden die de apparaten kunnen bereiken (zie tabel I). In principe kan men natuurlijk op een verdeelpunt dat geschikt is voor het aansluiten van het meest gecompliceerde randapparaat (b.v. een bandgeheugen) en het allersnelste (b.v. een geheugen met magnetische schijven) ook eenvoudiger randapparaten aansluiten. Met het oog op de kostenfactor zal het echter aanbeveling verdienen een onderverdeling te maken van de randapparaten naar snelheid en vereist aantal stuursignalen.

Ontwikkelingstendensen bij de randapparatuur

In de ontwikkeling van randapparatuur zijn twee hoofdstromingen te onderkennen: enerzijds het ontwikkelen van nieuwe apparaten die nieuwe toepassingen mogelijk moeten maken, anderzijds het verbeteren van bestaande apparaten, vooral wat betreft snelheid, betrouwbaarheid en prijs. Bij snelle drukinrichtingen b.v. kan men zich met het oog op de reeds zo grote hoeveelheid uitgevoerde gegevens met reden afvragen of hier een verdere verhoging der druksnelheid nog wel zin heeft. Aangezien bij commerciële informatieverwerking de uitgevoerde gegevens meestal weer worden verdeeld, is het benutten van deze gegevens hier echter over het algemeen geen probleem.

Nieuwe randapparaten

Tegenwoordig is het slechts bij uitzondering mogelijk om de informatie in zijn oorspronkelijke vorm direct in de informatieverwerkende installatie in te voeren. Meestal moeten de gegevens eerst met de hand op ponskaarten of ponsband worden overgebracht voordat de machine deze kan verwerken. Door leesmachines [6] te ontwikkelen tracht men dit knelpunt bij de informatieverwerking op te heffen. Het is nog niet te zeggen wanneer de ideale oplossing, waarbij de machine zelfs met de hand geschreven tekst direct kan inlezen, in de praktijk verwezenlijkt zal worden. De ontwikkeling in die richting voltrekt zich stap voor stap, waarbij men allereerst de informatie een zodanige vorm geeft dat de vooralsnog gebrekkige leesmachine er iets mee kan doen. Een eerste stap is de leesmachine voor de aanstreep-ponskaart („mark sensing"), welke b.v. met de hand gemerkte ponskaarten machinaal in geponste kaarten verandert [7,8,9]. De volgende stap is het lezen van min of meer genormaliseerde tekens langs magnetische of optische weg. De magnetische aflezing wordt intussen reeds op grote schaal, vooral bij het bankwezen in de U.S.A., toegepast. Ook het foutloos optisch lezen van normale gedrukte cijfers is in de praktijk reeds mogelijk. Omdat de gegevens op vele plaatsen worden vastgelegd (b.v. met een gewone schrijfmachine), doch op slechts weinige plaatsen worden geïnterpreteerd, tracht men het leesvermogen van de machines zozeer te verbeteren dat men minder zware eisen aan de vorm van de tekens behoeft te stellen. Ook tracht men de leessnelheid te verhogen. Aangezien de informatie meestal van afzonderlijke documenten gelezen moet worden, is het in elk geval voldoende wanneer de leestijd kort is ten opzichte van de transporttijd (b.v. bij het sorteren). Als volgende stap in deze ontwikkeling hoopt men het machinale lezen van met de hand geschreven cijfers mogelijk te maken [10].

Een ander hoogtepunt bij de automatisering van de invoer zou ongetwijfeld zijn het machinaal herkennen en registreren van het gesproken woord. Onmiddellijk dicteren in de rekenmachine zou wegens de geringe spraaksnelheid uiteraard niet veel zin hebben, doch men zou wel een op een willekeurige plaats besproken magnetische band kunnen invoeren. Reeds geruime tijd probeert men om althans de tien gesproken cijfers machinaal te herkennen [11,12].

Vele van de nieuwe eisen die men aan de randapparaten stelt vloeien voort uit de informatieverwerking *op afstand*. Aangezien men hierbij op talrijke plaatsen informatie wil in- en uitvoeren, ontstaat er behoefte aan kleine toestellen, nl. goedkopere uitvoeringen van bestaande, zoals b.v. apparaten om de getallen te controleren (digit-check) of af te beelden, ofwel geheel nieuwe toestellen waarmee goedkoop gegevens kunnen worden vastgelegd, zoals b.v. de combinatie van toetsenbord en drukmachine met een eenvoudige magneetbandopnemer. Bij de informatieverwerking op afstand treden belangrijke problemen op wat betreft de datatransmissie, de ontwikkeling van aansluitapparatuur (MODEM) en het detecteren van fouten. Vooral bij gebruik van telefoonlijnen via een centrale, maken de optredende overspreekverschijnselen het detecteren van fouten in de transmissie zeer belangrijk. Gezien de kosten hiervan, en vooral gezien de tegenwoordig nog vrij hoge huur van een telefoonlijn, zal men zich, indien informatie over grote afstanden moet worden overgebracht, van geval tot geval moeten afvragen of de tijdsbesparing ten opzichte van het vervoer van b.v. ponsband per trein of langs de weg, wel tegen deze kosten opweegt. Datatransmissie stelt ook hogere eisen aan de bandponsmachines. Wil men een buffergeheugen ver-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

mijden, dan moeten de apparaten b.v. asynchroon kunnen werken en moet in de ponsbandlezer de band over een geheel transmissieblok kunnen worden teruggezet.

Voor de grote geheugens zullen in de toekomst wellicht supergeleidende lagen worden toegepast, waarmee men een zeer hoge informatiedichtheid en een uiterst korte opzoektijd (10 μs) zal kunnen bereiken [13]. Voorlopig zullen echter de conventionele magnetische lagen de boventoon blijven voeren, en dan waarschijnlijk in de vorm van geheugens met magnetische schijven of kaarten. Hierbij tracht men het ontwerp zo te maken dat grote hoeveelheden informatie in de kortst mogelijke tijd ingeschreven en uitgelezen kunnen worden. In dit streven kan men twee hoofdrichtingen onderkennen: enerzijds tracht men de magnetische koppen zo snel mogelijk naar de gewenste adressen te brengen. Zulke geheugens zijn met slechts enkele, doch kostbare opzoekmechanismen uitgerust. De andere mogelijkheid is het gebruik van relatief langzame opzoekmechanismen, waarvan dan een groter aantal aanwezig moeten zijn [14].

Voor bepaalde subprogramma's bij de informatieverwerking, zoals b.v. het sorteren of afdrukken van de inhoud van magnetische banden, het overschrijven van de gegevens van ponskaarten of ponsbanden op magnetische banden of dergelijke, gebruikt men thans in de regel het centrale rekenorgaan, hetgeen voor de meeste toepassingen ook de meest rationele oplossing is. Zodra echter, b.v. bij informatieverwerking op afstand, het centrale rekenorgaan geheel door zijn eigenlijke taak in beslag worden genomen, zullen kleine hulpapparaten van groter belang worden, die, hoewel ze slechts voor één bepaald doel gebruikt kunnen worden, in grote series goedkoop te vervaardigen zijn.

Verbetering van bestaande randapparaten

Gezien het grote verschil tussen de verwerkingssnelheid van het centrale rekenorgaan en de snelheid van de tegenwoordige in- en uitvoerapparaten, werken deze laatste over het algemeen niet direct samen met het centrale rekenorgaan, doch via magneetbandapparaten, die beter aan de verwerkingssnelheid van het centrale rekenorgaan zijn aangepast („off line-behandeling"). Er moet dus worden gestreefd naar een schijnbare verhoging van de snelheid der randapparaten. Juist door het streven om de gegevens direct te verwerken (gegevens verzamelen, transporteren, verwerken en verdelen in één gesloten cyclus zodra ze beschikbaar zijn) heeft men behalve een grote geheugencapaciteit snelle randapparaten nodig. Naarmate het echter mogelijk is een groot aantal overeenkomstige randapparaten gezamenlijk op het centrale rekenorgaan aan te sluiten, wordt de absolute werksnelheid van elk dier apparaten een punt van minder belang. Men moet dan de snelheden en de kosten van de apparaten tegen elkaar afwegen. Aldus bezien, kan men b.v. een drukmachine, die voor een dubbele snelheid ook tweemaal zo duur is, slechts in enkele gevallen als een verbetering beschouwen.

Tot slot van dit hoofdstuk nog enkele opmerkingen over de betrouwbaarheid: bij randapparaten heeft men meestal met elektromechanische toestellen te maken. Het percentage elektronische bouwelementen dat tijdens de werking in een bepaald tijdvak bezwijkt is bij de huidige elementen na een aanlooptijd (voor vroegtijdige defecten) binnen hun levensduur vrijwel constant. Het genoemde percentage neemt daarentegen bij mechanische onderdelen in de loop van hun levensduur voortdurend toe doordat ze aan mechanische slijtage onderhevig zijn. Bovendien gaat deze toeneming steeds sneller naarmate de snelheid van het desbetreffende apparaat wordt opgevoerd. Met het oog hierop zal men trachten, althans bij de snelle randapparaten, zoveel mogelijk mechanische onderdelen te vervangen door elektronische. Anderzijds moet men niet uit het oog verliezen dat een bepaalde onderhoudsroutine, zoals die bij mechanische onderdelen kan worden uitgevoerd (door revisie en vervanging van onderdelen na een bepaalde werkperiode), bij elektronische schakelingen over het algemeen niet mogelijk is.

Enige mogelijkheden om de snelheid van randapparaten op te voeren

Grenzen van de snelheid van mechanische inrichtingen

De mechanische eigenschappen van de informatiedragers (breukvastheid, elasticiteitsgrens, enz.) enerzijds en de massakrachten en massadraaimomenten die worden veroorzaakt door niet-eenparige bewegingen anderzijds, stellen een grens aan de snelheid van randapparaten. Terwijl bij magneetbandapparaten de grens van de belastbaarheid der tegenwoordige banden vrijwel is bereikt, blijft men b.v. bij ponsband nog onder

[6] I. Sieburg, Verfahren und Möglichkeiten zur automatischen Zeichenerkennung, Nachrichtentechn. Z. **14**, 349-357, 1961.
[7] Optical reading machine, Data Processing **6**, 24-33, 1964 (jan.-febr.).
[8] C. M. B. Reid, A reader for hand-marked documents, Electronic Engng. **33**, 274-278, 1961.
[9] F. A. Frankl, Transcribing field markings by optical scanning, Electronics **34**, no. 31, 49-51, 1961.
[10] E. C. Greanias, P. F. Meagher, R. J. Morman en P. Essinger, The recognition of handwritten numerals by contour analysis, IBM J. Res. Devel. **7**, 14-21, 1963 (no. 1).
[11] K. H. Davis, R. Bidulph en S. Balashek, Automatic recognition of spoken digits, Bell Lab. Rec. **31**, 52, 1953 (no. 2).
[12] E. E. David, jr. en O. G. Selfridge, Eyes and ears for computers, Proc. IRE **50**, 1093-1101, 1962.
[13] J. A. Rajchman, Computer memories — possible future developments, RCA Rev. **23**, 137-151, 1962.
[14] Intern technisch Bericht Isys 63-N10, N.V. Informatiesystemen, Den Haag.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de theoretische grens gesteld door de sterkte van het papier [15].

De genoemde niet-eenparige bewegingen kunnen tweeërlei oorzaak hebben:

1) Het mechanisch registreren van de gegevens: hierbij onderscheiden we de bewegingen van het eigenlijke registratiemiddel (b.v. de ponsstiften en de matrijzen bij het ponsen, of de hamers en de types bij het drukken) en de bewegingen van de informatiedrager. Het eigenlijke drukken bij de sneldrukker gaat zo vlug dat de hamers tegen een met eenparige snelheid draaiende typewals of typeketting kunnen slaan („vliegende druk"). Voor het ponsen van band of kaarten daarentegen dienen niet alleen de ponsstiften of matrijzen een niet-eenparige beweging uit te voeren, doch dit geldt ook voor de informatiedrager: gedurende het ponsen moet de informatiedrager in rust zijn, om te voorkomen dat de gaten uitscheuren. Zou men het ponsen, althans gedeeltelijk, door een snijbeweging vervangen, dan zou althans een eenparige beweging van de kaart of band mogelijk zijn.

2) Het binnen een bepaalde tijd in beweging zetten en stoppen van de informatiedrager: dit treedt op als de informatiedrager een band is; zo moet b.v. een ponsband tussen twee tekens, een magnetische band in het interval tussen twee blokken informatie, gestopt en weer gestart kunnen worden. Hiervoor moeten, behalve de traagheid van de informatiedrager, de massakrachten en massatraagheidsmomenten van het transportmechanisme overwonnen worden.

Tabel II geeft een overzicht van de thans bij moderne randapparaten optredende bewegingen van registratiemiddelen en informatiedragers. Van de twee bovengenoemde voorwaarden die leiden tot discontinue bewegingen levert die genoemd onder (1) de meeste moeilijkheden op. Terwijl bij het stoppen van b.v. ponsband de remweg 1,5 mm mag zijn, moeten de stapvormige verplaatsingen tijdens het ponsen met een nauwkeurigheid van $\pm$ 0,05 mm plaatsvinden.

Ten einde de snelheid op te voeren, kan men de volgende maatregelen nemen:

a) vermindering of uitsluiting van „schadelijke massa";
b) vermindering van de verplaatsing;
c) vervanging van intermitterende bewegingen door een eenparig roterende beweging;
d) verhoging van de registratiesnelheid door niet-mechanische, b.v. elektronische middelen (waarbij in het algemeen de kosten van de informatiedrager niet te veel mogen stijgen).

Een typisch voorbeeld van deze laatste maatregel vormt het niet-mechanische drukken, waarvan vooral het elektrografische systeem de laatste tijd steeds meer naar voren komt [16]. Jammer genoeg levert het huidige systeem geen kopieën, terwijl juist bij de commerciële toepassingen, waarbij deze hoge druksnelheid wordt gebruikt, een of meer kopieën als regel niet gemist kunnen worden. Men is dus gedwongen de kopieën of na elkaar te drukken (ten nadele van de effectieve snelheid), of tegelijkertijd, maar dan met een overeenkomstig bredere drukmachine (hetgeen de machine duurder maakt, hoewel deze kosten niet evenredig met het aantal gedrukte exemplaren oplopen). Ten slotte is het nog mogelijk na het drukken een aantal kopieën te maken; hiervoor zijn speciale apparaten ontwikkeld [17].

Transportinrichtingen met geringe massa

Wil men een massa M_n, b.v. van een stukje ponsband, over een afstand s verplaatsen, dan is het meestal niet mogelijk de hiertoe beschikbare kracht direct op de massa te doen aangrijpen. Meestal moet men om de kracht over te brengen vanaf de plaats waar hij beschikbaar is, een extra massa inschakelen, de schadelijke massa M_p, zoals dit schematisch in *fig. 1* is aangegeven. Meestal is zelfs $M_p \gg M_n$.

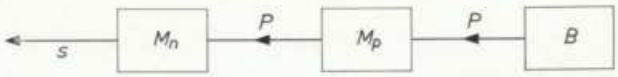


Fig. 1. Overbrenging van de kracht P vanaf de krachtbron B naar de bewegende massa M_n via een schadelijke massa M_p. s is de verplaatsing die M_n onder invloed van de kracht ondergaat.

Tabel II. Bewegingen bij moderne randapparaten voor elektronische informatieverwerkende installaties.

	Beweging van het registratiemiddel voor schrijven resp. lezen	Beweging van de informatiedrager	Snel starten en stoppen van de informatiedrager
Ponsbandlezer	geen	eenparig	ja
Ponskaartenlezer	geen	kaart voor kaart	neen
Bandponser	niet-eenparig	stap voor stap	ja
Kaartenponser	niet-eenparig	stap voor stap	neen
Documentenlezer	geen	document voor document	neen
Mechanische sneldrukker	niet-eenparig	stap voor stap	ja
Elektrografische sneldrukker	geen	kan eenparig zijn	ja
Bandgeheugen	geen	eenparig	ja
Geheugen met magnetische kaarten	geen	kaart voor kaart	neen
Groot trommel- of schijfgeheugen	niet-eenparig	eenparig	neen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De verplaatsing van massa M_n over weg s door kracht P (die gedurende de weg geacht wordt constant te zijn) vereist een tijdsduur

$$t = \sqrt{2s \frac{M_p}{P}\left(1 + \frac{M_n}{M_p}\right)}.$$

Wil men de massa M_n in de kortst mogelijke tijd over een bepaalde afstand verplaatsen, dan dient de verhouding P/M_p zo groot mogelijk te zijn. Langs mechanische weg (b.v. met excentriek en drijfstang) kan men waarden tot ongeveer 5 N/g bereiken.

Elektromagneten

De elektromagneet is wat betreft de schadelijke massa een gunstig aandrijfmechanisme. Mits goed gedimensioneerd, kan men hiermee P/M_p-verhoudingen van ongeveer 50 N/g verkrijgen. Wegens de hiervoor noodzakelijke verzadiging van het anker is dit aandrijfmechanisme echter slechts voor een relatief kleine verplaatsing (enige tienden van een mm) bruikbaar. Een voordeel is verder nog dat de magneet vrijwel niet aan slijtage onderhevig is. Zoals bekend, zijn dergelijke magneten zeer geschikt voor het bewegen van de aandrukrol en de rem in het mechanisme voor bandtransport; dit in verband met de kleine verplaatsing die hierbij nodig is. De prestaties van een magneet kunnen nog worden verbeterd met behulp van een geschikte elektronische stuurschakeling (b.v. met thyristors).

Schokgolven

Men kan nog aanzienlijk grotere P/M_p-verhoudingen bereiken wanneer men schokgolven, zoals die b.v. ontstaan bij vonkontladingen, mechanische arbeid laat verrichten. Met een elektrische energie van slechts enkele tienden Ws kan men op deze wijze P/M_p-verhoudingen van de orde van 10^7 N/g bereiken. Dergelijke schokgolven kunnen b.v. in plaats van ponsstiften voor het ponsen van band worden gebruikt. Dank zij de bijna drie orden van grootte snellere ponswerking kan de ponsband tijdens het ponsen continu in beweging blijven, zodat het stap-voor-stap voortbewegen van de band, dat bij de huidige bandponsers een verdere verhoging van de snelheid in de weg staat, niet langer nodig is. Het starten en stoppen van de band, dat uiteraard nog steeds nodig is, kan door de bovengenoemde magnetische aandrijving bijna een orde van grootte sneller gebeuren dan het huidige stap-voor-stap transport.

Men kan de schokgolven ook toepassen bij snel-

[15] A. D. Booth, The transport of paper tape in digital computation, J. Brit. I.R.E. **20**, 657-660, 1960.
[16] E. Webster, The impact of non-impact printing, Datamation **9**, 24-30, 1963 (no. 9).
[17] Copying printed computer results, Data Processing **6**, 34-37, 1964 (jan.-febr.).

drukkers. Bij mechanische sneldrukkers wordt de snelheid vooral beperkt door afwijkingen in de synchronisatie van de hameraanslag en de stand van de typewals of -ketting. Aangezien men het tijdstip waarop de schokgolven worden opgewekt minstens een orde van grootte nauwkeuriger kan bepalen dan dat van mechanische bewegingen, moet ook een ongeveer tienmaal grotere druksnelheid (regels/s) bereikbaar zijn. Indien men anderzijds afziet van snelheidsverhoging, kan men dank zij de veel kortere tijd die voor het eigenlijke drukken nodig is, de drukker als seriedrukker uitvoeren, wat zowel voor de drukker zelf als voor de rekenmachine kostenbesparend werkt. Dit is vooral bij eenvoudige machines van belang.

Vermindering van de verplaatsing

Om bij een gegeven P/M_p-verhouding een korte insteltijd voor de massa M_n te verkrijgen, dient men de noodzakelijke verplaatsing zo klein mogelijk te houden. In het algemeen is dit echter niet zonder meer mogelijk: zo wordt b.v. bij ponsband de verplaatsing bepaald door de genormaliseerde afstand tussen de gaten van 1/10 inch.

Fig. 2 toont het principe van een transportmechanisme voor ponsband, waarbij de discontinu bewegende delen slechts een verplaatsing van minder dan 0,05 mm ondergaan. Door een juiste samenwerking van twee remmen, een transportrol en een aandrukrol wordt een discontinu transport van de ponsband verwezenlijkt.

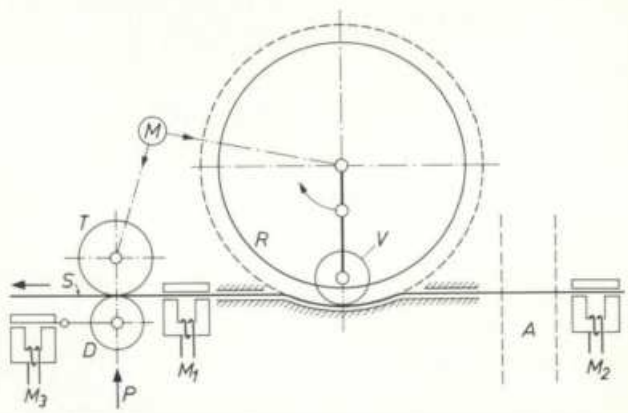


Fig. 2. Principe van een transportmechanisme voor ponsband. De aandrijfrol T en het wiel R worden continu aangedreven door de motor M. In de ruststand zijn de remmen M_1 en M_2 bekrachtigd terwijl de rol V de band S in een bocht heeft geduwd. Als de band verplaatst moet worden, wordt eerst door bekrachtiging van magneet M_3 de aandrukrol D tegen rol T gedrukt, zodat deze tracht de band in de richting van de pijl te transporteren. Onmiddellijk hierna wordt rem M_1 gelost, zodat de band kan worden strakgetrokken en hij aan de linkerzijde een stukje wordt verschoven. Nu wordt de rem M_1 weer bekrachtigd en M_2 losgemaakt. De eerstvolgende keer dat de rol V passeert, wordt de band weer in een bocht geduwd waarbij hij aan de rechterzijde verschuift over een afstand gelijk aan het verschil in lengte tussen de strakke en de gebogen band. Het ponsen of lezen van de band gebeurt bij A.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Schijfgeheugen met roterende koppen

Fig. 3 toont het principe van een geheugen met magnetische schijven waarbij de koppen niet discontinu in radiale richting langs de schijven worden verplaatst, doch doorlopend cirkelbanen over de schijven beschrijven. Het kiezen van het juiste spoor vereist hierbij geen versnelling of afremming van massa, aangezien alle sporen van een geheugenschijf in één omwenteling successievelijk worden afgetast. De sporen hebben de vorm van hypocycloïden, waarvan de parameters bepaald worden door de verhouding der toerentallen van de geheugenschijf P en van de magnetische koppen (bevestigd op schijf K).

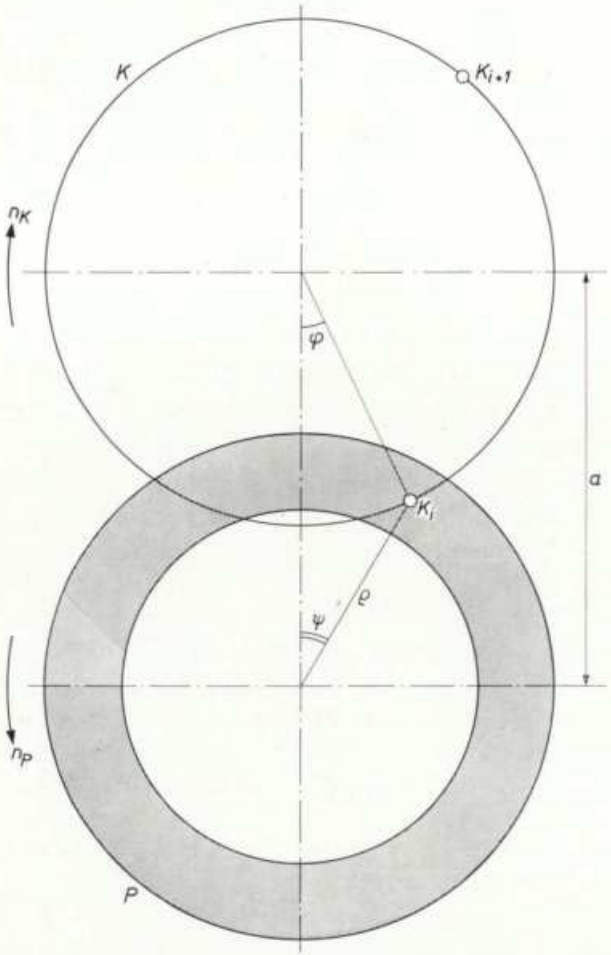


Fig. 3. Principe van het schijfgeheugen met roterende koppen De geheugenplaat P voert een eenparige rotatie uit met toerental n_P. Op de schijf K zijn een of meer radiaal gerangschikte rijen K_i van een of meer magnetische koppen gemonteerd; deze schijf roteert eenparig met toerental n_K. De asafstand a wordt zodanig gekozen dat de baan van de koppen een voldoend groot gebied van de geheugenschijven bestrijkt. Wanneer de rij K_i p koppen bevat, worden door K_i bij het strijken over het deel van de schijf waar de sporen liggen (grijs), p sporen parallel afgelezen. Het selecteren van een bepaald adres op een geheugenschijf geschiedt door op het moment dat de geheugenschijf en de koppenschijf bepaalde hoekstanden ϕ resp. ψ innemen, het lees- of het schrijfkanaal in werking te stellen. De sporen (zijnde de banen beschreven door radiusvector ρ) vormen delen van hypocycloïden waarvan de parameters bepaald worden door de verhouding van de toerentallen van de geheugenschijf en de schijf met magnetische koppen.

Voor de constructie van een dergelijk geheugen bestaan er, afhankelijk van het aantal m stapels van geheugenschijven die rondom de as met de koppenschijven kunnen worden geplaatst, en van het aantal k rijen met elk p koppen, verscheidene oplossingen, die onderling verschillen voor wat betreft de kosten van mechanische en elektronische onderdelen, de geheugencapaciteit en de opzoektijd. Het quotiënt van de geheugencapaciteit C van één schijfkant (in bits) en de opzoektijd τ hangt van de diverse parameters af volgens:

$$\frac{C}{\tau} \approx \frac{pmk}{7} f,$$

waarin f de bit-frequentie is bij het uitlezen, resp. inschrijven. De verhouding C/τ bereikt bij een hoge bitfrequentie (die door de toelaatbare omtreksnelheid van de koppenschijf of ook wel door de elektronische hulpapparaten begrensd blijft) gunstige waarden.

Samenvatting. De taak van de randapparaten bestaat hoofdzakelijk uit het in- en uitvoeren van informatie en uit het opslaan van grote hoeveelheden informatie. Ze worden gekenmerkt door de aard van de gebruikte informatiedrager, door hun opzoektijd en door de stroom van informatie die zij kunnen verwerken. Naast de verbetering van de bestaande randapparaten, hoofdzakelijk door verhoging van de snelheid en de betrouwbaarheid en door verlaging van de kosten, wordt de richting waarin de ontwikkeling voortgaat bepaald door nieuwe toepassingsmogelijkheden van informatieverwerkende installaties en door rationalisatie van het gebruik daarvan, b.v. met behulp van een universeel verdeelpunt tussen het centrale rekenorgaan en de randapparaten. Aan de snelheid wordt een grens gesteld, ofwel door de mechanische sterkte van de eigenlijke informatiedrager, ofwel door de massakrachten en massadraaimomenten, die in het apparaat optreden als gevolg van het uitvoeren van niet-eenparige bewegingen. Door vermindering van de schadelijke massa's, verkleining van de noodzakelijke verplaatsingen, vervanging van stapsgewijze verplaatsingen door eenparig roterende bewegingen, en het gebruik van niet-mechanische verschijnselen voor registratie, kan in bepaalde gevallen een verhoging van de snelheid worden verwacht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Beveiliging van informatie bij invoer en transmissie met behulp van één of twee controletekens

G. Renelt en J. Schröder

621.391.088.6

Inleiding

Door het voortdurend aangroeien van de hoeveelheden machinaal te verwerken informatie (data) worden beveiligingen tegen het optreden van fouten van steeds groter belang. Fouten ontstaan dikwijls als de invoer in de machine met de hand geschiedt, of bij transmissie van data via gestoorde transmissiekanalen.

Wil er controle op fouten mogelijk zijn, dan moet men aan de informatie een zekere redundantie toevoegen, b.v. in de vorm van één of meer controletekens, òf zij moet deze redundantie reeds bevatten. De eenvoudigste controle waaraan men kan denken, is een herhaling van de oorspronkelijke informatie; deze wijze van beveiligen is evenwel niet alleen kostbaar, maar ze leidt ook tot betrekkelijk slechte resultaten, omdat de aanwezige fouten dikwijls eveneens herhaald worden. Beter is het de controletekens volgens een vast voorschrift uit de data zelf af te leiden. In geval de informatie slechts uit de cijfers van decimale getallen bestaat, is een bekend voorbeeld van een dergelijk voorschrift het berekenen van de som van de afzonderlijke cijfers; deze som wordt dan aan de informatie als controleteken toegevoegd.

Bestaat de informatie uit een vaste reeks van tekens die een bepaald begrip voorstelt, dan is het verstandig de controletekens als vast onderdeel in deze reeks op te nemen. Dit geldt b.v. voor alle volgnummers, zoals rekening-, depot-, polis-, kohier-, salaris-, artikel-, opdracht-, contract-, wagonnummers enz. De aangeboden nummers kunnen dan reeds bij de invoer in het apparaat dat deze moet verwerken (b.v. een boekhoud- of factureermachine), volgens het vaste voorschrift op hun juistheid gecontroleerd worden. Dat kan b.v. aldus gebeuren dat het controleteken opnieuw uit de oorspronkelijke delen van de informatie wordt samengesteld en met het controleteken van de reeks vergeleken wordt. Is er een verschil, dan is er bij het invoeren van de reeks een fout gemaakt; men kan dan gaan proberen de fout te herstellen, b.v. door de invoer nog eens te herhalen.

Gebruikt men slechts één controleteken, dan kan het gebeuren — in het bijzonder wanneer er meer dan één foutief teken optreedt — dat de foute reeks toch het goede controleteken oplevert. De fouten worden dan niet aan het licht gebracht. Beschouwt men b.v. een decimaal getal van drie cijfers dat beveiligd wordt door middel van een vierde cijfer, dan heeft men voor de duizend mogelijke decimale getallen slechts tien controlecijfers ter beschikking. Het toevoegen van een controlecijfer aan een decimaal getal is dus niet afdoende: er is een grote verzameling onvindbare fouten. Verder moet in aanmerking genomen worden dat er ook fouten kunnen ontstaan bij de invoer of de transmissie van de controletekens zèlf. Daarom is het, zelfs bij een uitvoerige beveiliging met behulp van een groot aantal controletekens, niet mogelijk om alle fouten te signaleren. De eis die men aan een goed beveiligingssysteem moet stellen, is, dat het op eenvoudige wijze een zo groot mogelijk deel van alle fouten signaleert.

Nu treden echter in de praktijk niet alle mogelijke soorten fouten even frequent op; integendeel, het grootste deel van alle werkelijk voorkomende fouten behoort in het algemeen tot een klein aantal vaste soorten. Bij de invoer en de transmissie in het bijzonder overwegen gewoonlijk de fouten die slechts één teken betreffen; we noemen dat enkelvoudige fouten. Bij de bewerking van informatie door de mens, speciaal bij de invoer van data door middel van een toetsenbord, komen daarnaast vooral de verwisselingsfouten voor; hierbij verwisselen twee naburige tekens van plaats.

Berekent men van een reeks cijfers eenvoudig de som, dan kunnen daarmee reeds alle enkelvoudige fouten gevonden worden. Is b.v. gegeven de reeks 87029, dan vindt men de som 26; bij iedere verhoging van een cijfer vindt men een grotere en bij iedere verlaging een kleinere som.

Beschouwt men nu alle reeksen van vijf cijfers van 00000 t/m 99999, dan kan de som van de cijfers alle waarden van 0 t/m 45 aannemen; bij langere reeksen kunnen uiteraard nog grotere sommen voorkomen en vanaf een reekslengte 12 kan de som reeds groter dan 100 worden. Zou men als controleteken de genoemde som zelf gebruiken, dan zou men in zo'n geval dus verscheidene cijfers aan de te beveiligen reeks moeten toevoegen, wat voor een beveiliging tegen alle enkelvoudige fouten nogal omslachtig is. Door echter het aantal waarden dat het controleteken kan aannemen, op geschikte wijze te reduceren, kan men hetzelfde resultaat ook bereiken met een controleteken dat slechts één plaats inneemt.

Deze beperking is mogelijk door toepassing van een *eindig* getallensysteem, in het bijzonder een zg. restklassesysteem. Een restklassesysteem ontstaat precies

Dipl.-Math. G. Renelt en Dipl.-Ing. J. Schröder zijn medewerkers van het laboratorium Hamburg van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

als het systeem der natuurlijke getallen (0, 1, 2, 3, . . .) door, te beginnen bij 0, bij ieder gevonden getal 1 op te tellen, met dit verschil echter dat bij een restklassesysteem na een eindig aantal (M) stappen de beginwaarde 0 weer bereikt wordt, zodat, als men verder gaat, dezelfde reeks weer opnieuw verkregen wordt enz. In plaats van door een rechte lijn kan men getallen van een restklassesysteem het best aanschouwelijk voorstellen door een cirkel die in M gelijke delen verdeeld is. Ieder natuurlijk getal M correspondeert met een eigen restklassesysteem, zoals b.v. $M = 12$ hoort bij de verdeling in uren, of $M = 60$ bij de verdeling in minuten van een wijzerplaat.

Ieder restklassesysteem bezit precies M verschillende getallen die kunnen worden voorgesteld door de waarden 0, 1, 2, 3, . . ., $(M - 1)$. Evenals bij de natuurlijke getallen het geval is, kan men twee getallen van een restklassesysteem bij elkaar optellen. Verkrijgt men bij de natuurlijke getallen een som die gelijk is aan M of groter, dan moet men er M van aftrekken om het overeenkomstige resultaat in het restklasseysteem te vinden. Gaat men uit van de natuurlijke getallen, dan kunnen alle grote getallen gereduceerd worden tot getallen die kleiner dan M zijn, door er een veelvoud van M af te trekken. Men noemt dan alle getallen die slechts M of een veelvoud van M verschillen „congruent modulo M". Zo verkrijgt men b.v. bij de optelling $8 + 7$ in het restklassesysteem $M = 12$ het resultaat: $8 + 7 = 15 \equiv 3 \bmod 12$. (Een eenvoudige methode om grote getallen op deze wijze snel te reduceren is ook: delen door M en zien wat de rest is; in ons voorbeeld $15 : 12 = 1$ rest 3.)

Blijft men daarentegen binnen het restklassesysteem — wat in de praktijk gemakkelijk te realiseren is met behulp van een ringteller met M posities —, dan verkrijgt men onmiddellijk het juiste resultaat. In ons voorbeeld zou de ringteller twaalf posities hebben en van de uitgangspositie af na zeven stappen (9, 10, 11, 0, 1, 2, 3) in positie 3 gekomen zijn. Moet men de som bepalen van de reeks 87029 dan volgt er na de genoemde positieverandering nog één (van twee stappen) waarbij positie 5 bereikt wordt, en vervolgens nog een van negen stappen, die tot de eindpositie 2 leidt ($14 \equiv 2 \bmod 12$). Samen met het controleteken 2 luidt de beveiligde reeks tekens dus 870292. Men kan gemakkelijk inzien dat ook met deze gereduceerde som alle enkelvoudige fouten te vinden zijn; bij iedere verhoging of verlaging van een cijfer (ten hoogste met 9) gaat de ringteller evenveel posities vooruit of achteruit, zodat in ieder geval een andere eindpositie bereikt wordt dan 2, en er dus een ander controleteken wordt geproduceerd.

Bij verscheidene reeksen van cijfers kan in ons voorbeeld ook de eindpositie 10 of 11 optreden. Wil men ook in deze gevallen het controleteken beperken tot een teken van slechts één plaats, dan kan dit gebeuren door een bijzonder teken te gebruiken; b.v. kan men voor 10 een plusteken en voor 11 een minteken aan de te beveiligen reeks toevoegen (b.v. 87026—). Een andere eenvoudige mogelijkheid is dat men de posities van de teller niet aanduidt met getallen maar met letters, b.v. A, B, C, enz. In ons voorbeeld zou dan de beveiligde reeks getallen luiden: 87029C.

Het toevoegen van letters, of nog algemenere tekens, aan de restklassen heeft ook zin wanneer men reeksen van tekens moet beveiligen die niet, of niet uitsluitend, uit decimale getallen bestaan. Ook voor deze, meer algemene, reeksen wordt het dan mogelijk een controleteken te produceren door het definiëren van een som. Zijn b.v. aan de reeks A, B, C . . . weer de cijfers 0, 1, 2, . . . toegevoegd en wil men de reeks CAB beveiligen door een controleteken dat weer de som representeert, dan luidt, volgens de optelling $2 + 0 + 1 = 3$, de beveiligde reeks: $CABD$. Natuurlijk kan men ook voor decimale getallen een dergelijke toevoeging (codering) toepassen; de codecijfers behoeven niet noodzakelijk identiek te zijn met de gecodeerde. Hetzelfde geldt voor tekens die worden voorgesteld door meer dan één binaire cijferplaats.

Moeten er letters beveiligd worden, dan heeft men voor de codering 26 verschillende getallen nodig. In dit geval moet M dus ten minste 26 zijn ($M \geqq 26$). Ter beveiliging van reeksen waarin letters, cijfers van decimale getallen, en misschien ook bijzondere tekens, zoals $+ - . , :$ enz., voorkomen, is het noodzakelijk nog grotere restklassesystemen (b.v. met $M \geqq 42$) toe te passen; behoeft men daarentegen alleen maar decimale getallen te beveiligen, dan kan men met een kleiner aantal waarden uitkomen. Hoewel hier het restklassesysteem modulo 10 van bijzonder belang is, is het in het algemeen toch aanbevelenswaardig M wat groter te kiezen; we komen hierop nog terug.

Algemene regels voor het construeren van controletekens

Met de som van de tekens, zoals hierboven bedoeld, kan men, ook wanneer deze modulo M gereduceerd wordt, alle enkelvoudige fouten vinden; verwisselingsfouten echter niet. Wil men zich ook tegen laatstgenoemde fouten beveiligen, dan moet de constructie van het controleteken op een iets meer verfijnde manier plaatsvinden. Dit kan gebeuren door de tekens niet voor alle plaatsen op dezelfde manier aan de getallen van de restklasse toe te voegen, maar voor iedere plaats van de reeks op een andere manier (b.v. voor de eerste plaats geldt: $A \leftrightarrow 1$, $B \leftrightarrow 2$, . . . ; voor de tweede plaats geldt: $A \leftrightarrow 9$, $B \leftrightarrow 5$, . . . enz.). Worden nu de tekens z die op plaats i kunnen staan, gecodeerd met de waarden van de functie $F_i(z)$, en staat er in een gegeven reeks van m plaatsen (het controleteken niet

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

meegeteld) op plaats i het teken $z = z_i$, dan kan de waarde P van het controleteken voor deze reeks gevonden worden uit de volgende gegeneraliseerde som:

$$P \equiv \sum_{i=1}^{m} F_i(z_i) \bmod M . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Moet men b.v. de reeks *HHDS* beveiligen, en wordt in een restklassesysteem modulo 29 op plaats één de H gecodeerd met een 7, op plaats twee de H met 16, op plaats drie de D met 26, en op plaats vier de S met 3, ofwel: $F_1(H) = 7$, $F_2(H) = 16$, $F_3(D) = 26$, $F_4(S) = 3$, dan verkrijgt men als controleteken het teken dat gecodeerd wordt met $P = 23$. ($P = 7 + 16 + 26 + 3 \bmod 29$).

In het algemeen zal men de codering zo kiezen dat men tegen een zo'n groot mogelijk aantal fouten beveiligd is. Wil men alle enkelvoudige fouten op plaats i signaleren, dan moeten de waarden $F_i(z)$ voor alle waarden van z verschillend zijn:

$$F_i(z) \not\equiv F_i(z') \bmod M \quad \text{voor } z \neq z' . \quad . \quad . \quad (2)$$

Verwisseling van de tekens z en z' tussen de plaatsen i en j, daarentegen, wordt gesignaleerd wanneer de *verschillen* van de F-waarden ongelijk zijn:

$$F_i(z) - F_j(z) \not\equiv F_i(z') - F_j(z') \bmod M \quad \text{voor } z \neq z' . \quad (3)$$

Door het invoeren van gewichtsfactoren kan men diverse coderingen verkrijgen die deze gewenste eigenschappen in hoge mate bezitten. Daartoe worden eerst de tekens z toegevoegd aan de restklassen Z (b.v. $A \leftrightarrow 1, B \leftrightarrow 2, \ldots$ of bij cijfers: $1 \leftrightarrow 1, 2 \leftrightarrow 2, \ldots$). De, voor iedere plaats specifieke, coderingen ontstaan dan hieruit door de restklassen Z te vermenigvuldigen met verschillende gewichten G_i, zodat $F_i(z) \equiv G_i \cdot Z \bmod M$; voor de G_i neemt men gehele getallen.

Berekenen we hiermee volgens het recept van verg. (1) voor een gegeven reeks het controlegetal P, dan is dit dus gelijk aan de gewogen som van de toegevoegde getallen Z_i, waarbij iedere Z_i zoveel maal geteld wordt als zijn gewicht G_i bedraagt:

$$P \equiv \sum_{i=1}^{m} G_i \cdot Z_i \bmod M . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Gebruikt men b.v. afwisselend de gewichten 1 en 2, dan vindt men het controlecijfer uit: $P \equiv Z_1 + Z_2 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_4 + Z_5 + \ldots \bmod M$; hiermee zijn althans alle naburige verwisselingsfouten te signaleren.

Willen alle enkelvoudige fouten gevonden kunnen worden, dan moet steeds de betrekking (2) gelden. Dat betekent voor de gewogen som (4) dat de gewichten G_i relatief priem moeten zijn ten opzichte van M, d.w.z. dat de grootste gemene deler van G_i en M gelijk moet zijn aan 1 (bij $M = 6$ is b.v. alleen mogelijk $G_i = 1$ en $G_i = 5$). Alle verwisselingsfouten tussen plaats i en plaats j daarentegen zijn overeenkomstig (3) alleen te vinden wanneer het verschil van de gewichten $(G_i - G_j)$ relatief priem is ten opzichte van M. Daarom is het goed om als modulus M van een restklassesysteem een priemgetal te nemen. Gebruikt men dan verder, bij het berekenen van een controlegetal volgens (4), voor alle G_i verschillende waarden ($G_i = 1, 2, \ldots M - 1$ in een willekeurige volgorde), dan kan men in een reeks die niet langer is dan $M - 1$ tekens, met één enkel controlegetal alle enkelvoudige fouten vinden alsmede alle verwisselingsfouten.

Door aanvullende maatregelen kan ook tegen andere soorten van fouten een even effectieve beveiliging worden verkregen. Zo is het b.v. mogelijk om ook alle dubbele fouten — d.w.z. willekeurige fouten op twee willekeurige plaatsen — met zekerheid te signaleren, en wel door een tweede controleteken toe te voegen, dat verkregen wordt uit de som modulo M waarvan hierboven steeds sprake was.

Met een restklassesysteem modulo M waarbij M *geen* priemgetal is, kan een zo effectieve beveiliging *niet* bereikt worden. In het bijzonder interesseert ons daarbij natuurlijk het restklassesysteem modulo 10. Wil men alle enkelvoudige fouten vinden, dan komen hier voor het berekenen van een gewogen som alleen de gewichten 1, 3, 7 en 9 in aanmerking. Daar de verschillen van deze gewichten niet relatief priem zijn ten opzichte van 10, kan evenwel een deel van de naburige verwisselingsfouten niet gevonden worden; van de 45 verwisselingsfouten die mogelijk zijn, geldt dit voor de vijf verwisselingsen 05 met 50, 16 met 61 enz. Voor het berekenen van een controlecijfer is het in dit geval gunstiger om terug te keren naar de uitgangsformule (1). Kiest men b.v. afwisselend de twee codes ($F_{2s} = F_1$, $F_{2s+1} = F_2$):

z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$F_1(z)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$F_2(z)$	2	4	6	8	1	3	5	7	9	0

, . . (5)

dan worden, behalve alle enkelvoudige fouten, ook alle naburige verwisselingsfouten gesignaleerd, met uitzondering alleen van de verwisseling $89 \leftrightarrow 98$. De in (5) toegepaste verschuiving $F_1(z) = z + 1$ is voor de beveiliging tegen verwisselingsfouten niet essentieel; het voordeel ervan is dat daardoor ook fouten die ontstaan door weglaten of toevoegen van nullen aan het eind van de reeks, gesignaleerd worden. De tweede codering is hier ontstaan uit de eerste door een gemodificeerde verdubbeling; bij het verdubbelde bedrag wordt nog opgeteld het aantal sprongen naar de plaats 1 dat heeft plaatsgevonden ($F_2 \equiv 2F_1 + [0{,}2\,F_1] \equiv [2{,}2\,F_1] \bmod 10$). Ook andere coderingen zijn echter denkbaar. Wil men met één controlecijfer alle enkelvoudige fouten vinden,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dan blijft bij een restklassesysteem modulo 10 echter altijd ten minste één verwisselingsfout tussen naburige plaatsen onvindbaar. (Berekent men nl. de som van alle $F_1(z)$ of $F_2(z)$ voor $z = 0$ tot 9, dan blijkt deze gelijk te zijn aan 5 mod 10, omdat uit (2) volgt dat alle restklassen moeten voorkomen; het verschil $\Sigma\{F_1(z)-F_2(z)\}$ is dus gelijk nul: derhalve kan er aan de voorwaarde (3) niet voldaan zijn.)

De efficiëntie van de beveiliging tegen fouten

Zoals hierboven werd uiteengezet, kan men met een goede beveiliging weliswaar de meeste fouten uitschakelen, maar niet alle. De kans dat fouten niet gevonden worden, kan men uitdrukken in het quotient van het gemiddelde aantal niet gevonden fouten (ofwel: foutieve reeksen van tekens) en het totale aantal reeksen dat men verwerkt heeft. Deze kans is de grootheid die ons in de praktijk dikwijls het meest interesseert uiteindelijk. Betrekt men deze kans op de totale kans op het optreden van fouten (gesignaleerde of niet-gesignaleerde), dan verkrijgt men een maat, de reductiefactor R, waarmee de efficiëntie van een beveiliging kwantitatief beschreven kan worden [1]:

$$R = \frac{\text{kans op een niet gevonden fout}}{\text{totale kans op fouten}} = \frac{\text{gemiddeld aantal niet gevonden fouten}}{\text{totaal aantal fouten}} \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Drukt men de reductiefactor uit in procenten, dan heeft men het aantal dat in 100 fouten (gemiddeld) niet gevonden wordt. Voor een gegeven foutenverdeling en een gegeven wijze van beveiligen is de reductiefactor een constante die niet afhangt van het aantal fouten dat in een bepaald geval optreedt. Bestaan de optredende fouten uit groepen k (= 1, 2, . . . enz.) van verschillende soort en ter grootte b_k, en noemen we de reductiefactor die voor één groep geldt r_k, dan geldt voor de reductiefactor R van het geheel:

$$R = \sum_k b_k \cdot r_k, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

$$r_k = \frac{\text{gemiddeld aantal niet-gesignaleerde fouten van soort } k}{\text{totaal aantal fouten van soort } k}.$$

Om de berekening te kunnen uitvoeren, moet de foutenverdeling die in het desbetreffende geval is opgetreden, bekend zijn. Beschouwt men b.v. alle fouten die bij de transmissie ontstaan ten gevolge van ruis,dan geldt voor ieder teken een storingskans β die er niet van afhangt of de andere tekens al dan niet gestoord zijn. Bij een reeks die n tekens lang is, zal dan het soort fout waarbij het aantal tekens k bedraagt, een kans $b_k = b(k)$ hebben om voor te komen, die uit de verdeling van Bernoulli volgt:

$$b(k) = \binom{n}{k} \frac{\beta^k\,(1-\beta)^{n-k}}{1-(1-\beta)^n} \approx \frac{1}{k}\binom{n-1}{k-1}\beta^{k-1} \text{ voor } n\beta \ll 1. \quad . \quad . \quad (8)$$

In het bijzonder is:

$$b(1) = 1 - \frac{n-1}{2}\,\beta.$$

Men ziet hieraan dat er bij zwakke storing (β klein) in hoofdzaak alleen enkelvoudige fouten voorkomen, en dat bij deze verdeling reeksen waarin veel foute tekens voorkomen, zeer zeldzaam zijn. Treden er *systematische* fouten op, dan kan men afwijkingen van de verdeling (8) verwachten. De foutenverdeling b_k moet dan gevonden worden door een omvangrijk waarnemingsmateriaal te analyseren. Voorbeelden van zulke fouten zijn storingen en kortstondige onderbrekingen in telefoonleidingen, fouten bij het invullen van formulieren of bij de invoer van informatie door middel van een toetsenbord. De verdeling van de fouten die gewoonlijk optreden bij het ponsen van gaten in kaarten, ziet er als volgt uit [2]:

Soort van fout k	b_k
1. Eén cijfer fout	76,5%
2. Afhankelijke fout in twee cijfers (b.v. verwisseld)	5,9%
3. Onafhankelijke fout in 2 cijfers	7,3%
4. Cijfer(s) te veel of te weinig	9,5%
5. Andere fouten	0,8%

Alle fouten van soort 1 en soort 2 kunnen gesignaleerd worden met een controleteken volgens (4) waarin alle gewichten G_i onderling verschillend zijn en M een priemgetal is; in dat geval is $r_1 = r_2 = 0$. Verder worden de overige fouten gereduceerd tot een fractie die van M afhangt: $r_3 = r_4 = r_5 = 1/M$. Met dit controleteken krijgt men bij $M = 11$ voor de totale reductiefactor R een waarde 1,6% en bij een foutenfrequentie van $1^0/_{00}$ dus een kans op niet gesignaleerde fouten van $1{,}6 \times 10^{-5}$. Na deze controle zijn er dus van 125 000 met een toetsenbord ingevoerde reeksen van tekens, gemiddeld nog maar twee fout. Is de lengte der reeksen constant, dan is het bovendien nog mogelijk alle fouten van soort 4 te elimineren ($r_4 = 0$), en wel door ook het aantal plaatsen te tellen. Voegt men bovendien aan de beveiliging nog een tweede controleteken toe dat verkregen wordt uit de som van de cijfers, dan worden ook alle fouten van soort 3 ge-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

signaleerd ($r_3 = 0$) en wordt er een beveiliging verkregen die b.v. voor een restklassesysteem modulo 13 nog een factor 350 beter is ($r_5 = 1/13^2$). De kans op een niet-gesignaleerde fout is nu $4{,}6 \times 10^{-8}$ zodat gemiddeld meer dan 20 miljoen reeksen ingevoerd moeten worden, wil er één fout optreden.

Grondslagen van de technische uitvoering

Thans zullen we nagaan hoe beveiligingsapparaten die gebaseerd zijn op de hierboven gegeven beschouwingen, in principe gerealiseerd kunnen worden. Deze apparaten hebben twee taken te vervullen: in de eerste plaats moeten alle gegevens die later foutloos verwerkt moeten worden, voorzien worden van controletekens; in de tweede plaats moeten alle reeksen van tekens die een controleteken hebben, op fouten gecontroleerd worden. Hiertoe zijn echter niet twee verschillende apparaten nodig: met het apparaat dat de controletekens vaststelt, kan men zonder veel extra moeite ook de controle zelf uitvoeren.

Zoals we gezien hebben, verkrijgt men een bijzonder effectieve beveiliging wanneer men als controleteken een gewogen som gebruikt volgens verg. (4) en als daarin alle gewichten onderling verschillend zijn en de modulus M van het restklassesysteem een priemgetal is. Het berekenen van alle hiertoe vereiste produkten $G_i \cdot Z_i$ zou de zaak nogal gecompliceerd maken. Men kan evenwel het gewenste resultaat met behulp van het volgende principe ook eenvoudiger bereiken. De cijfers $Z_1, Z_2, Z_3, \ldots$ van de reeks komen, eventueel via een parallel-serieschakelaar, stuk voor stuk in het apparaat; dit bevat als het meest essentiële onderdeel een teller met modulus M. Bij het begin staat deze teller in de nulstand. Bij de eerste stap wordt het cijfer Z_0 (bij 0) opgeteld en vervolgens wordt de stand van de teller (modulo M) verdubbeld, b.v. door bij het resultaat nogmaals Z_1 mod M op te tellen, bij de tweede stap wordt het cijfer Z_2 bij het zojuist verkregen resultaat opgeteld en de nieuwe stand van de teller wordt opnieuw verdubbeld enz. Wordt b.v. de reeks 11728 ingevoerd, dan verkrijgt men in een restklassesysteem modulo 11 achtereenvolgens de volgende tellerstanden: 1,2; 3,6; 2,4; 6,1; 9,7. Als controleteken wordt ten slotte het M-complement van de laatste tellerstand gebruikt; in ons voorbeeld dus een 4, het complement van 7. Formuleert men dit algemeen, dan luidt de formule voor het controleteken:

$$P \equiv -\sum_{i=1}^{m} 2^{m+1-i} Z_i \bmod M. \quad \ldots \quad (9)$$

Zoals een vergelijking met (4) aantoont, kan men dit beschouwen als een gewogen som met de gewichten:

$$G_i \equiv -2^{m+1-i} \bmod M. \quad \ldots \quad (10)$$

In tegenstelling met (4) zijn de gewichten hier echter ook afhankelijk van de lengte m van de reeks. Dat heeft het voordeel dat bij het weglaten of toevoegen van nullen aan het eind van de reeks de gewichten veranderen en dus in het algemeen ook het controleteken; deze fouten kunnen dus eveneens gesignaleerd worden. Daarentegen hebben nullen aan het begin van de reeks, juist zoals we wensen, geen invloed op het controleteken. Op die manier kan men eventueel de reeksen aanvullen tot ze allemaal even lang zijn.

Voor de restklassesystemen die het meest van belang zijn, te weten die met $M = 11$ en $M = 13$ (of ook $M = 19$ en $M = 29$), verkrijgt men met (10) uitsluitend verschillende gewichten indien de maximale lengte van de reeksen niet groter is dan $M - 1$ tekens; bij deze reekslengten zijn de omstandigheden dus optimaal. Bij nog grotere lengte van de reeksen treedt dan bovendien automatisch nog een cyclische herhaling van deze gewichten op, zonder dat hiervoor extra-maatregelen nodig zijn. Voor de restklassesystemen waarvoor (10) niet alle mogelijke gewichten omvat, kan in plaats van een verdubbeling van iedere optredende tellerstand ook een vermenigvuldiging met een factor q worden uitgevoerd; daarbij zal men de factor q zo kiezen dat alle gewichten machten van q worden (men noemt q dan ook wel een primitieve wortel van het restklassesysteem — voor $M = 31$ b.v. $q = 3$ — en spreekt van het vormen van een polynoom van Horner). In het algemeen is het op deze wijze steeds mogelijk een optimale beveiliging te verkrijgen.

De controlerende functie van het apparaat — hierbij moeten dus de reeksen met hun controleteken op eventueel opgetreden fouten gecontroleerd worden — wordt bijzonder eenvoudig omdat bij het vaststellen van het controleteken volgens (9) ook het complement berekend is. De controletekens worden precies eender behandeld als de overige tekens van de reeks en brengen dus, als een volledige reeks foutloos wordt ingevoerd, de teller op nul; iedere andere stand van de teller wijst op de aanwezigheid van een fout. In ons voorbeeld zou het controleteken 4 van de volledige reeks 117284 de op dat ogenblik bereikte tellerstand 7 met vier plaatsen verhogen. De daardoor ontstane tellerstand nul, die ook bij een verdubbeling behouden blijft, toont dan aan dat het invoeren van de reeks foutloos geschied is.

Het principeschema van elektronische apparaten tot beveiliging van informatie tegen fouten, vindt men weergegeven in *fig. 1*. De verwerking van getallen geschiedt door middel van groepen van impulsen, waarbij het

[1] H. Aulhorn, H. Lange en H. Marko, Probleme und Anwendungen der Datenübertragung, Elektron. Rechenanlagen **3**, 148, 1961.

[2] Kontrolle mit Hilfe von Kontrollziffern, Bürotechn. Sammlung **1**, sept. 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

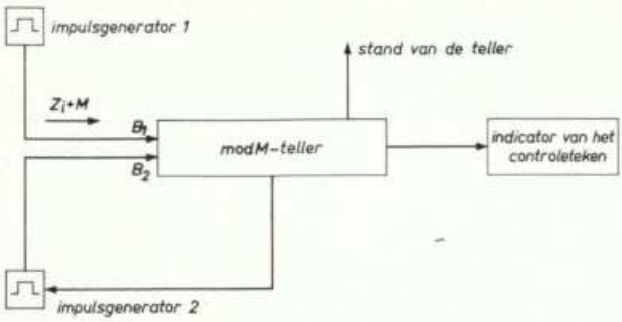


Fig. 1. Principe van een apparaat tot beveiliging van informatie tegen fouten.

aantal impulsen van een groep correspondeert met de getalwaarde van het desbetreffende teken. De impulsgenerator *1* geeft bij de stap *i* een groep van Z_i impulsen af. Deze bereiken via de ingang *B1* de modulo-*M*-teller en draaien de teller een even groot aantal plaatsen verder. De impulsgenerator *2* voegt hier via de ingang *B2* zoveel impulsen aan toe als nodig is om de tellerstand te verdubbelen. Dit is eenvoudig aldus te realiseren dat aan de teller via *B1* nog *M* extra-impulsen worden toegevoegd en laatstgenoemde bij het bereiken van de nulstand de impulsgenerator *2* inschakelt. Vanaf dit ogenblik worden evenzovele impulsen als van de impulsgenerator *1* de teller bereiken, even later ook nog een keer via de ingang *B2* aan de teller toegevoerd. Aan het aantal impulsen dat na de nuldoorgang van de teller via *B1* binnenkomt, en dat de teller juist weer op de oude stand brengt, wordt dus nog eens een gelijk aantal toegevoegd zodat de teller automatisch de gewenste dubbele eindwaarde (modulo *M*) aanwijst. Het complement van de tellerstand kan men aflezen op het apparaat dat het controleteken produceert. Nadat alle stappen $i = 1, 2 \ldots, m$, hebben plaatsgevonden — dat wil zeggen als alle tekens zijn ingevoerd —,kan het controleteken direct op dit apparaat worden afgelezen.

Wordt daarentegen een volledige reeks tekens ingevoerd, *inclusief het controleteken*, dan is het voor het signaleren van fouten voldoende om te controleren of de teller op nul staat.

Een elektronisch controle-apparaat met een controleteken modulo 11

In *fig. 2* vindt men het blokschema van een elektronisch apparaat voor het controleren van getallen dat werkt met een controleteken in het restklassesysteem modulo 11. Aan de hand van deze figuur zullen we dit apparaat thans bespreken en wel met gebruikmaking van het diagram dat men geschetst vindt in *fig. 3*; dit diagram geeft het tijdschema weer volgens hetwelk diverse impulsen worden afgegeven en verder kan men er de stand van de diverse wipschakelingen uit aflezen.

Het berekenen van het controleteken

De informatie- en controletekens worden aan het apparaat toegevoerd door middel van een toetsenbord. Men kan dit toetsenbord natuurlijk ook vervangen door de uitgang van een of andere informatieverwerkende machine — een machine die zelf b.v. ponskaarten of ponsband krijgt toegevoerd — en aldus het controleapparaat koppelen met in- en uitvoerapparatuur. Het toetsenbord is verbonden met een teller *1*, die elf verschillende standen kan hebben en die b.v. gebouwd is als binaire viertrapsteller met terugkoppeling. Door het, via de toetsen, invoeren van het eerste teken komt teller *1* op de stand $11 - Z_1$ te staan. Tegelijkertijd wordt, via de vertragingsschakeling *Mo1*, de monostabiele wipschakeling *Mo2* geëxciteerd, die zich in het besturingsgedeelte bevindt. De vertraging door de schakeling *Mo1* moet ervoor zorgen dat het besturingsgedeelte pas begint te werken als de teller *1* zijn nieuwe stand bereikt heeft. Gedurende de metastabiele periode van *Mo2* wordt het linkerdeel van de bistabiele wipschakeling *Bi1* in een zodanige toestand gebracht dat deze wipschakeling omklapt zodra via de ingang *A1* de eerstvolgende flank „L"→„0" van een klokimpuls binnenkomt. Door dit omklappen wordt de EN-schakeling *E1* geopend, met als gevolg dat de klokimpulsen ook de teller *1* en de ingang *B1* van teller *2* kunnen bereiken; teller *2* kan in principe identiek zijn met teller *1*. Daar teller *1* zich in de stand $11 - Z_1$ bevindt, verschijnt aan de uit-

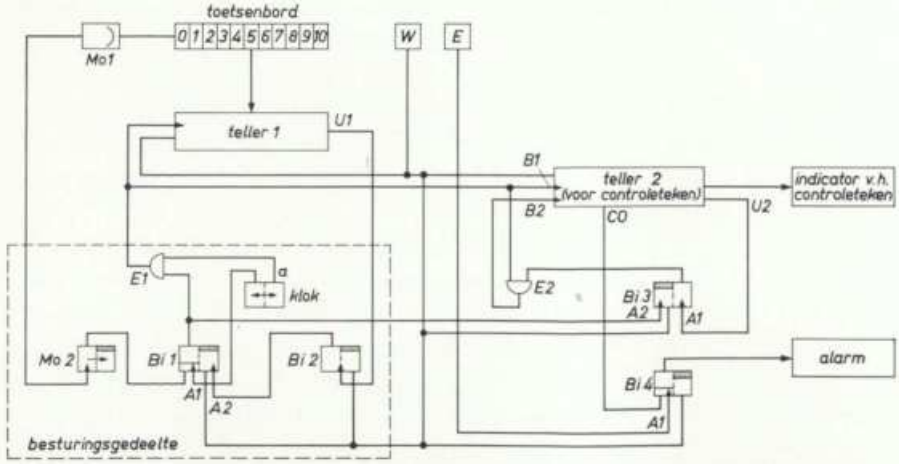


Fig. 2. Apparaat tot beveiliging van getallen, werkend met één controleteken modulo 11.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

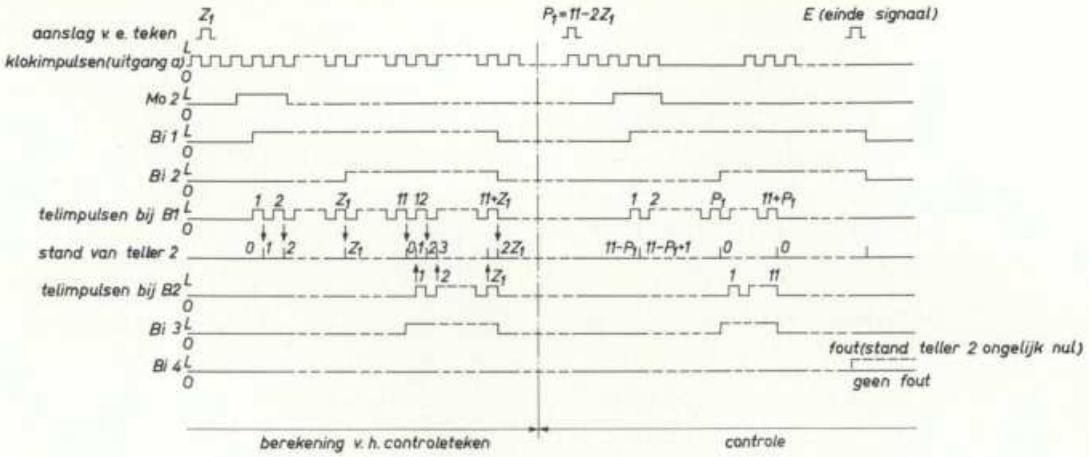


Fig. 3. Tijddiagram van de impulsen die optreden in de schakeling van fig. 2.

gang *U1* ervan na precies Z_1 klokimpulsen een nuldoorgangsimpuls, en klapt de bistabiele wipschakeling *Bi2* om. Na de volgende 11 impulsen verschijnt er aan *U1* weer een nieuwe nuldoorgangsimpuls en klapt de bistabiele wipschakeling *Bi2* terug; deze brengt daarmee, via de ingang *A2*, de bistabiele wipschakeling *Bi1* terug in de oorspronkelijke toestand. Daardoor wordt de EN-schakeling *E1* gesloten en de verbinding met de klok verbroken. Aan de ingang *B1* van teller *2* verschijnen dus in totaal $Z_1 + 11$ impulsen. Daar deze teller aanvankelijk in stand 0 stond, veroorzaakt de nuldoorgangsimpuls die na 11 telimpulsen aan de uitgang *U2* van laatstgenoemde teller verschijnt, via de ingang *A1* het omklappen van de bistabiele wipschakeling *Bi3*. Daardoor wordt de EN-schakeling *E2* geopend. Deze blijft open gedurende Z_1 telimpulsen, met name totdat de, na $Z_1 + 11$ impulsen terugklappende, schakeling *Bi1* de schakeling *Bi3* via *A2* in de oorspronkelijke positie terugbrengt. De ingang *B1* van teller *2* spreekt aan op de flank „L" → „0" van de telimpulsen, de ingang *B2* daarentegen op de flank „0"→„L". Zolang *E2* open is, wordt, blijkens het bovenstaande, iedere telimpuls in de teller *2* dubbel geteld. Aan het eind van het telproces staat in teller *2* het resultaat $2Z_1$ mod 11 dat we wensen. Zou er, terwijl *E2* open is, aan de uitgang *U2* nog een nuldoorgangsimpuls verschijnen, dan kan deze de stand van *Bi3* niet beïnvloeden. Slaat men op het toetsenbord het volgende teken aan, dan komt teller 1 op $11 - Z_2$. Voor het overige herhaalt zich het zojuist beschreven proces. Er worden door het besturingsgedeelte en teller *1* samen $Z_2 + 11$ impulsen geproduceerd en toegevoerd aan teller *2*. Bovendien wordt, als teller *2* door de nulstand gaat, door de impuls die aan *U2* verschijnt, de wipschakeling *Bi3* omgeklapt, zodat de resterende impulsen ook bij de ingang *B2* terechtkomen. Als gevolg daarvan krijgen we de stand $(2Z_2 + 4Z_1)$ mod 11 van de teller enz. Na de invoer van ieder afzonderlijk teken wordt het berekende controleteken, als complement mod 11 van de stand van de teller, nagenoeg zonder vertraging geproduceerd. In het beschreven apparaat verloopt het gehele rekenproces, afgezien van de vertraging door *Mo1* voor het natrillen van de toetscontacten, binnen 1 ms af.

Het produceren van een controleteken

Bij het produceren van een controleteken biedt het systeem mod 11 nog een bijzondere mogelijkheid. Volgens (9) wordt het controleteken zodanig berekend dat bij een juiste invoer van de informatie de gewogen som steeds nul is. Derhalve kan men bij reeksen van tekens waarvan de gewogen som zónder controleteken reeds nul is, het toevoegen van het controleteken achterwege laten. (Werkt men met een constante reekslengte dan kan men de ongebruikt gebleven plaats bezetten door aan het begin van de reeks een nul toe te voegen.) Men heeft dan voor het kenmerken van de overige tien restklassen genoeg aan tien cijfers — b.v. kan men de cijfers van 1 t/m 9 gewoon toevoegen aan de restklassen 1 t/m 9 en het teken $z = 0$ aan de restklasse $Z = 10$. Laatstgenoemde toevoeging mag echter niet voor alle plaatsen van de reeks gelden. In het bijzonder moeten nullen die aan het begin van een reeks staan, uitgesloten worden; dit is bereikbaar door nog een bistabiele wipschakeling toe te voegen. Natuurlijk kan men evenzeer 11 verschillende controletekens gebruiken, b.v. letters of tien cijfers en een extra-teken (b.v. —).

De controle

Het controleren van een reeks die controletekens bevat, geschiedt, nadat de gehele reeks is ingevoerd, door het aanslaan van de toets *E* (einde reeks). Bevat de reeks een fout, dan staat teller *2*, nadat ook het controleteken is ingevoerd, niet in stand nul (de uitgang *CO* geeft het signaal „0" af), zodat de ingang *A1* van de controleschakeling *Bi4* bij het indrukken van de toets *E* omklapt, en een waarschuwingssignaal afgeeft. Dit

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

signaal kan een licht- of een geluidssignaal zijn, of het blokkeert een ander apparaat. De toets *W* (wissen) dient ertoe het apparaat gereed te maken voor gebruik; drukt men deze toets in, dan worden alle bistabiele wipschakelingen in de begintoestand gebracht. terwijl ook, als er een fout gesignaleerd is, de teller *2* weer op nul wordt gezet en de schakeling *Bi4* terugklapt zodat het waarschuwingssignaal uitgeschakeld wordt.

Uitvoeringen voor de restklassesystemen modulo 13 en hoger

Dikwijls is het wenselijk om, behalve de 10 (decimale) cijfers, ook bijzondere tekens, zoals komma's en plustekens, te beveiligen tegen fouten. Ook is *één* controleteken niet voldoende wanneer de efficiëntie van de beveiliging zeer hoog moet zijn of wanneer het aantal fouten relatief groot is. In deze gevallen kan men een in dit hoofdstuk te beschrijven apparaat gebruiken, dat werkt met *twee* controletekens ($q_1 = 2$; $q_2 = 1$) in het restklassesysteem mod 13. De controletekens worden hier dus berekend volgens:

$$P_1 \equiv -\sum_{i=1}^{m} 2^{m+1-i} Z_i \bmod 13$$

en

$$P_2 \equiv -\sum_{i=1}^{m} Z_i \bmod 13.$$

Het schema van dit apparaat, inclusief het controlegedeelte, vindt men in *fig. 4*. Het controlegedeelte en de EN-schakelingen *E3* en *E4* kunnen achterwege blijven wanneer het apparaat alleen maar gebruikt wordt voor het berekenen van controletekens.

Het verloop van de berekening van de controletekens is precies eender als in het apparaat dat in het vorige hoofdstuk beschreven is. Het enige verschil bestaat daarin dat er, parallelgeschakeld met teller *2*, nog een teller *3* is die het tweede controleteken berekent.

De controle daarentegen verloopt wèl enigszins anders: de controletekens P_1 en P_2 die het laatst aangeslagen zijn, moeten afzonderlijk aan de desbetreffende teller — teller *2* resp. teller *3* — worden toegevoerd. Het dirigeren van de telimpulsen, eerst naar teller *2* en vervolgens naar teller *3*, geschiedt door de schakeling *Bi4*; iedere keer dat *Bi1* omslaat, wordt *Bi4* geëxciteerd. Alvorens de controle kan plaatsvinden, d.w.z. voordat men de controletekens kan aanslaan, moet de toets *Co* aangeslagen worden. Daardoor klappen zowel *Bi4* als *Bi5* om en is het apparaat in staat de volgende tekens als controleteken te interpreteren. Bij het aanslaan van P_1 klapt *Bi4* terug naar de oorspronkelijke stand en de telimpulsen (aantal P_1) kunnen alleen naar teller *2* gaan; de bistabiele wipschakeling *Bi4* heeft, via de OF-schakeling *O1*, de EN-schakeling *E3* geblokkeerd. Het volgende teken dat aangeslagen wordt, is P_2. Dit levert een groep van $P_2 + 13$ telimpulsen op die via de EN-schakeling *E3*, die nu open is, alleen naar teller *3* gaan omdat *E4* geblokkeerd is. Als deze impulsen verwerkt zijn en als de aangeslagen controletekens overeenstemmen met de eerder berekende, staan alle tellers op nul, de uitgangen *C2* en *C3* leveren het signaal „*L*". Daardoor kan, bij omklappen van *Bi1*, de flank „0" → „L" via de EN-schakeling *E5*, de ingang van *Bi5* bereiken en deze doen omklappen naar de aanvangspositie. Staan de tellers *2* en *3* niet allebei in de stand nul, dan is de EN-schakeling *E5* geblokkeerd; de schakeling *Bi5* klapt dan niet naar de aanvangspositie terug en aan de uitgang van de EN-schakeling *E6* verschijnt een alarmsignaal „L". Is er geen fout, dan staat het apparaat na het aanslaan van de controletekens automatisch in de beginpositie en kan de volgende reeks van tekens aangeslagen worden. Ter wille van de overzichtelijkheid zijn de verbindingen van de wistoets *W* met de diverse bistabiele wipschakelingen niet getekend; deze toets heeft dezelfde functie als in het apparaat van fig. 2.

Het apparaat kan nog uitgebreid worden met een teller die het aantal plaatsen telt. Op die manier verkrijgt men een absolute beveiliging tegen alle fouten die ontstaan door weglaten of toevoegen van cijfers. Vrijwel hetzelfde resultaat kan men ook bereiken zonder dat extra-apparatuur nodig is en wel door aan de cijfers of tekens uitsluitend restklassen toe te voegen die

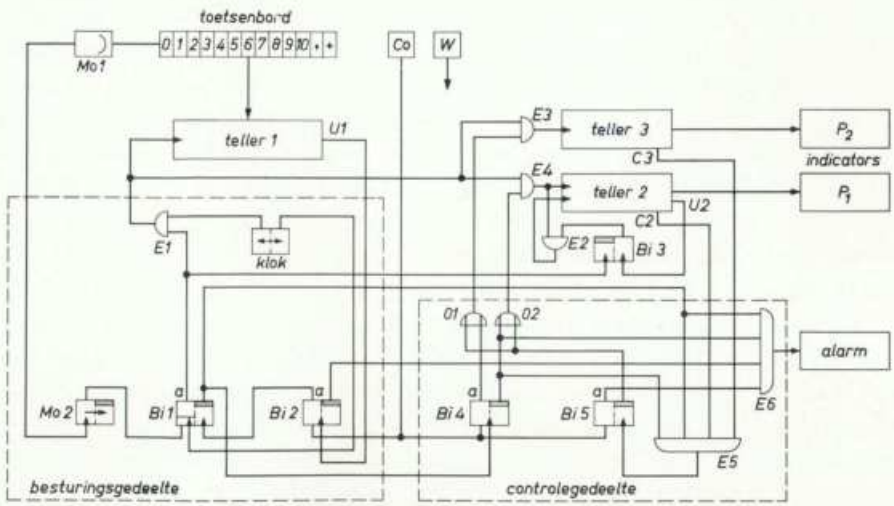


Fig. 4. Beveiligingsapparaat met twee controletekens modulo 13.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van nul verschillen. Zo kan men aan de cijfers 1 t/m 9 weer de restklassen 1 t/m 9 toevoegen en aan het teken $z = 0$ de restklasse $Z = 10$ (b.v. eveneens weer met uitzondering van nullen die aan het begin van een reeks staan). Met behulp van het tweede controleteken kunnen dan eveneens alle fouten die ontstaan zijn door het weglaten of toevoegen van een cijfer, door het controleapparaat gesignaleerd worden.

Op analoge wijze kan men ook in ieder ander restklassesysteem controleapparaten met één of twee controletekens maken. In het bijzonder is een betrekkelijk goede beveiliging te bereiken in het restklassesysteem modulo 10 en met slechts één controleteken wanneer men een gemodificeerde verdubbeling volgens (5) toepast waarbij de nuldoorgang in aanmerking wordt genomen. In tegenstelling tot het systeem met priemgetal kunnen dan met één controleteken, dat in gecompliceerdheid de volgens (1) gemaakte tekens overtreft, weliswaar niet alle maar toch een zeer groot deel van de verwisselingsfouten gesignaleerd worden, nl. bijna 98 % van alle naburige verwisselingen en meer dan 90 % van de niet-naburige, terwijl ook alle enkelvoudige fouten gevonden worden. Daarentegen zal men in andere gevallen, al naar het aantal symbolen dat beveiligd moet worden en het aantal ter beschikking staande controletekens, ook grotere restklassesystemen met vrucht kunnen gebruiken.

Samenvatting. Het tijdig signaleren van fouten in machinaal te verwerken informatie, b.v. bij de invoer of bij transmissie, is mogelijk wanneer men aan iedere reeks gegevens een controleteken toevoegt. Het controleteken moet op zodanige wijze uit de tekens van de te beveiligen reeksen zijn afgeleid, dat een zo groot mogelijk aantal fouten gevonden kan worden. Er wordt afgeleid onder welke voorwaarden alle fouten van de veel voorkomende soorten, zoals enkelvoudige fouten en verwisselingen, met zekerheid gesignaleerd kunnen worden. Op deze wijze kan de bij ieder systeem van beveiliging bestaande kans dat fouten niet gevonden worden, zeer klein gemaakt worden (b.v. met één controleteken tot ongeveer 10^{-5}, met twee tot minder dan 10^{-7}). Door geschikte principes toe te passen bij het opstellen van de wijze van berekenen van het controleteken en bij het oplossen van het probleem hoe zo'n rekenwijze elektronisch te realiseren, is een beveiligingsapparaat gemakkelijk te construeren. Er worden apparaten beschreven die volgens deze principes ontworpen zijn; daarmee kan men zowel de controletekens produceren als wel de controle uitvoeren. Aldus wordt met eenvoudige middelen een optimale beveiliging met één of twee controletekens bereikt.

Een nieuw systeem van digitale bouwstenen voor industriële meet- en regelapparatuur [*]

D. Gossel, G. Kaps en W. Schott

621.374.32

Inleiding

Het karakteristieke van de bouw van een digitale informatieverwerkende installatie is dat daarvoor slechts enkele verschillende typen basisschakelingen worden gebruikt, die echter elk in een zeer groot aantal voorkomen. Deze verschillende basisschakelingen of „bouwstenen" vormen te zamen een systeem.

Om te voldoen aan de wens een gegeven logisch ontwerp te kunnen verwezenlijken zonder dat men zich in schakeltechnische details behoeft te verdiepen, hebben verschillende fabrikanten series bouwstenen ontwikkeld die „èn"-, „òf"- en „negatie"-schakelingen bevatten, alsmede bistabiele wipschakelingen (flip-flops) voor toepassing bij tellers en geheugens [1,**].

Met een dergelijk systeem zou men in principe elk logisch ontwerp kunnen realiseren, maar men moet daarbij rekening houden met de randvoorwaarden van de schakelingen. Deze zijn gegeven in de vorm van omvangrijke belastingstabellen die de beperkingen van de onderlinge combinatiemogelijkheden van de verschillende bouwstenen aangeven. Naarmate een systeem meer verschillende typen omvat, worden deze tabellen steeds gecompliceerder, doordat het aantal verboden combinaties toeneemt. Men moet dan scheidingsversterkers van verschillende typen toepassen — b.v. emittervolgers met *P-N-P-* of *N-P-N*-transistors — hoewel deze generlei logische functie hebben, wat in strijd is met de oorspronkelijke opzet [2]. Zo zijn er systemen waarbij het totale aantal schakelingen dat voor een bepaald probleem moet worden gebruikt, in geen verhouding staat tot het aantal dat een logische functie heeft. Dit beïnvloedt niet alleen de kosten, maar ook de betrouwbaarheid, want met het toenemen van het aantal bouwelementen neemt ook de kans op storingen toe.

Men heeft geprobeerd door vermindering van het

Dipl.-Ing. D. Gossel, Dipl.-Ing. G. Kaps en Dipl.-Ing. W. Schott zijn medewerkers van het laboratorium Hamburg van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

[*] *Noot van de redactie:* Binnenkort zal in dit tijdschrift een artikel van E. J. van Barneveld, Philips' Hoofdindustriegroep ICOMA, Eindhoven, verschijnen, waarin een ander systeem van digitale bouwstenen wordt beschreven, dat in tegenstelling tot het thans gepresenteerde voor meer universeel gebruik is bestemd. Dit laatste systeem is door de genoemde Hoofdindustriegroep in produktie genomen.

[**] De aangehaalde literatuur vindt men aan het eind van dit artikel.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

aantal typen de bovengenoemde bezwaren te ondervangen. De schakelalgebra geeft daartoe de mogelijkheid aan met de formule van De Morgan [3]:

$$x_1 + x_2 + \ldots + x_n = \overline{\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \ldots \cdot \bar{x}_n}$$

resp.

$$x_1 \cdot x_2 \cdot \ldots \cdot x_n = \overline{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \ldots + \bar{x}_n}.$$

Deze formule geeft het verband tussen de operaties EN en OF en de negatie. Men ziet hieruit dat steeds de ene operatie kan worden vervangen door de andere operatie en de negatie.

De op het ogenblik veel toegepaste NAND- en NOR-technieken gaan nog een stap verder; hiermee is het mogelijk, door een geschikte combinatie in één basisschakeling van de EN-operatie en de negatie, resp. van de OF-operatie en de negatie, met slechts één type bouwstenen te volstaan [4]. *Fig. 1* toont hoe de basisoperaties EN en OF kunnen worden gerealiseerd met de NAND- en met de NOR-techniek. Elk NAND- resp. NOR-symbool vertegenwoordigt een basisschakeling die naast weerstanden, condensatoren en diodes minstens één transistor bevat.

Een tweede voordeel, naast het feit dat men voor logische schakelingen met één type bouwsteen kan volstaan, is dat bij NAND- en NOR-systemen van de belastingstabellen slechts één belastingsregel overblijft. Men hoeft alleen maar te weten hoeveel NAND- resp. NOR-schakelingen door één voorafgaande NAND- resp. NOR-schakeling betrouwbaar gestuurd kunnen worden. Andere vormen van belasting komen niet voor.

Een ernstig nadeel van deze methode is het grote aantal bouwstenen dat moet worden gebruikt om bepaalde operaties te realiseren. In fig. 1*a* ziet men dat voor de OF-operatie voor elke ingang een (tamelijk dure) NAND-bouwsteen nodig is. Daarentegen kan men de EN-functie vrijwel altijd, onafhankelijk van het aantal ingangen, met twee NAND-bouwstenen samenstellen. Een overeenkomstige situatie treedt op als men alleen NOR-bouwstenen gebruikt, met dien verstande dat dan EN en OF zijn verwisseld (fig. 1*b*) [5].

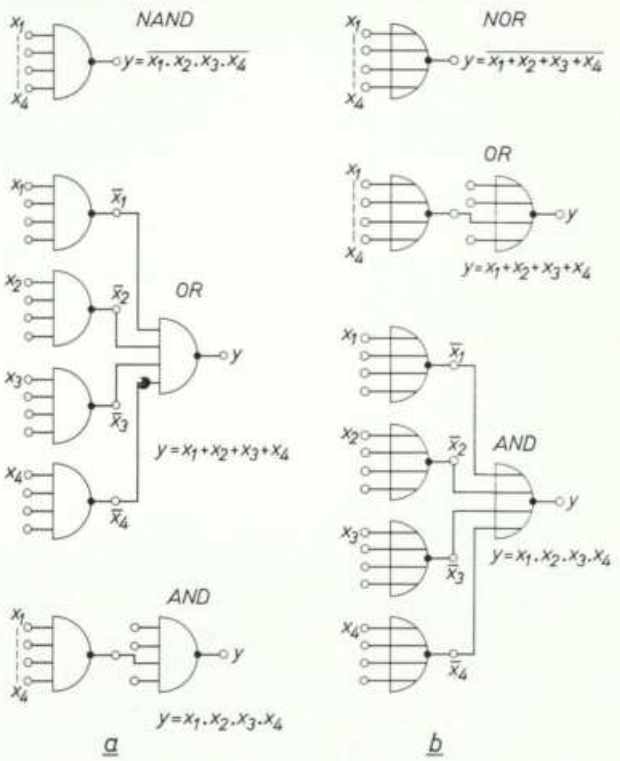


Fig. 1. Logische schema's van de OF-operatie (OR) en de EN-operatie (AND) uitgevoerd met *a*) NAND-schakelingen, *b*) NOR-schakelingen.

Het nieuwe systeem van bouwstenen

In dit artikel wordt een nieuw systeem van digitale bouwstenen beschreven, dat men kan beschouwen als een poging een goed compromis te bereiken tussen de twee hierboven beschreven ontwikkelingstendensen. Kenmerkend voor dit systeem is o.a. het gebruik van slechts twee logische basisschakelingen, een actieve en een passieve. De actieve bouwsteen bevat een schakeling van transistors en diodes (men noemt dit diode-transistor-logica, DTL) die bij de gekozen logische afspraak („L" ≙ 12 volt, „0" ≙ 0 volt) als NOR-schakeling werkt (fig. 2). De passieve bouwsteen is een EN-schakeling (ook wel EN-poort geheten) met twee ingangen (fig. 3), samengesteld uit diodes en weerstanden (diode-logica). Het aantal ingangen kan binnen ruime grenzen worden vergroot door enige EN-bouwstenen in een schakeling te combineren. Door het toevoegen van de passieve EN-bouwsteen vervalt de noodzaak om met NOR-bouwstenen een EN-schakeling op de kostbare in fig. 1*b* aangegeven wijze te realiseren.

Het onderhavige systeem van bouwstenen, dat speciaal is aangepast aan de eisen van de industriële meet- en regeltechniek, heeft verder nog de volgende kenmerkende eigenschappen.

1. Toepassing van slechts één type transistor en twee typen diodes; geen emittervolgers.
2. Genormaliseerde voedingsspanning ± 12 V ± 5%. Deze waarde blijkt het gunstigste compromis te zijn tussen
   a) een hoge spanning, met als voordelen een geringe gevoeligheid voor stoorsignalen en een grote vrijheid bij het combineren van verschillende aantallen en soorten bouwstenen — d.w.z. grote signaaltoleranties —, en
   b) een lage spanning, die gunstig is in verband met de maximaal toelaatbare spanning van de beschikbare transistors en wegens de kleine dissipatie.
3. Maximale schakelfrequentie 80 kHz, maximale telfrequentie 30 kHz. (In enkele gevallen kan de maximale

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

telfrequentie 80 kHz zijn.) Bij industriële toepassingen werken de elektronische schakelingen meestal samen met bewegende mechanische onderdelen die een zekere massa bezitten. De ervaring leert dat daarbij wegens de gestelde eisen ten aanzien van het scheidend vermogen (de nauwkeurigheid) en de snelheid, telfrequenties van hoogstens 10 kHz nodig zijn. Met 30 kHz kan dus ook aan extreme wensen worden voldaan.

4. Naar keuze asynchrone of synchrone telmethode. Voor eenvoudige problemen, waarbij langzaam wordt geteld, kan de bekende asynchrone methode worden gebruikt. Hierbij wordt b.v. een bistabiele wipschakeling gestuurd door een schakeling van hetzelfde type in de voorafgaande trap, die ook de omschakelenergie levert. De maximale telsnelheid wordt bepaald door de som van de looptijden van alle trappen, en daalt dus bij toenemend aantal trappen. De belastbaarheid per trap is bij de asynchrone teltechniek sterk gereduceerd.

Zodra men iets hogere eisen stelt, verdient de synchrone methode de voorkeur wegens zijn grote voordelen, hoewel er iets meer bouwstenen voor nodig zijn. Hierbij worden aan alle trappen van een telschakeling schakelimpulsen uit één gemeenschappelijke klokimpulsbron toegevoerd. Elke trap bezit een afzonderlijke signaalingang $\overline{S}$; de spanning die op deze ingang aanwezig is, bepaalt of een toegevoerde klokimpuls de schakeling al of niet doet omslaan. Deze werkwijze heeft de volgende consequenties.

a) De schakeling is in hoge mate ongevoelig voor storingen. Als gevolg van de vertragende werking van de impulspoort die via de $\overline{S}$-ingang wordt gestuurd, zullen stoorimpulsen in de signaalleidingen slechts dan foutieve omschakelingen kunnen veroorzaken, indien hun impulsduur > 5 µs is en tevens hun oppervlakte (spanning geïntegreerd over tijd) meer dan 60 µVs bedraagt en de klokimpuls meer dan 5 µs na het begin van de stoorimpuls wordt ontvangen. Het is onder normale omstandigheden zo onwaarschijnlijk dat gelijktijdig aan deze drie voorwaarden wordt voldaan, dat in de praktijk een uitstekende mate van storingsvrijheid verkregen wordt.

b) Er treedt aan de trappen geen dynamische belasting van enige betekenis op, daar de omschakelenergie door de gemeenschappelijke klokimpulsbron wordt geleverd. Met uitzondering van de klokimpulsleiding, waarvan lengte en capaciteit zo klein mogelijk moeten zijn, kunnen alle signaalleidingen als gelijkstroomleidingen worden uitgevoerd.

c) Onbelemmerd gebruik van de maximale schakelfrequentie. Alle trappen die moeten worden omgeschakeld, worden in de tijd tussen twee klokimpulsen voorbereid en schakelen daarna gelijktijdig om bij de eerstvolgende klokimpuls. Sommering van de looptijden van de opvolgende trappen treedt niet op. Aan de stijgtijd van de signaalspanning aan de $\overline{S}$-ingang worden geen zware eisen gesteld.

5. Bij het dimensioneren van de schakelingen is rekening gehouden met de ongunstigste spannings- en weerstandsafwijkingen binnen de toleranties en met de transistorgegevens voor het einde van de levensduur; ongestoord functioneren onder volle belasting is gewaarborgd binnen het temperatuurgebied van -10 °C . . . $+50$ °C.

6. Signaaltoleranties:

„L" ≙ $+6 \ldots +12$ V,
„0" ≙ $0 \ldots +1{,}8$ V.

De twee bouwstenen

De *actieve* bouwsteen (*fig. 2a*) bevat een poortschakeling met diodes ($D_1 \ldots D_5$, R_K, R_{BJ}, een omkeerschakeling en een impulspoort (D, C_P, R_S, R_T). De diodepoort en de omkeerschakeling vormen samen een NOR-trap, zodat tussen de uitgang C en de vier ingangen $B_1 \ldots B_4$ het volgende verband bestaat:

$$C = \overline{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}.$$

Desgewenst kan men het aantal ingangen uitbreiden door diodes toe te voegen, die dan aan een van de ingangen $B_1 \ldots B_4$ aangesloten moeten worden. De werking van de impulspoort zal te zamen met die van de tel- en geheugentrappen worden toegelicht.

De contacten zijn zodanig gerangschikt (fig. 2*b*) dat ook bij gecompliceerde schakelingen de verbindingen tussen de bouwstenen vrijwel zonder kruisingen kunnen worden uitgevoerd (zie fig. 5).

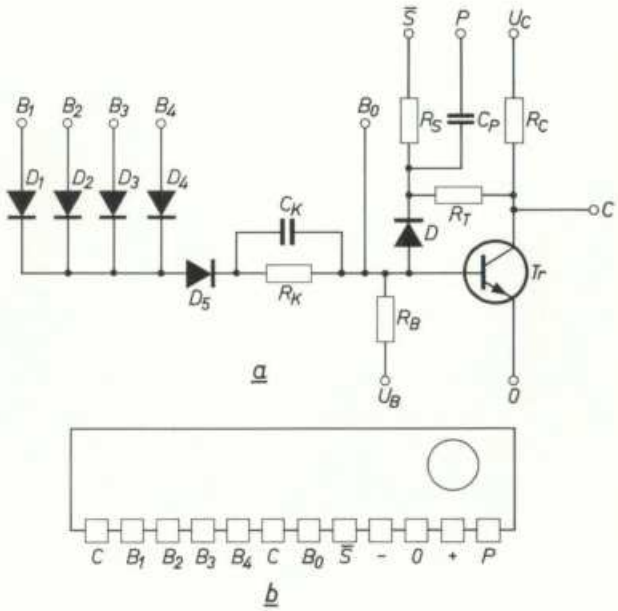


Fig. 2. *a*) Schema van de NOR-trap, *b*) rangschikking van de contacten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

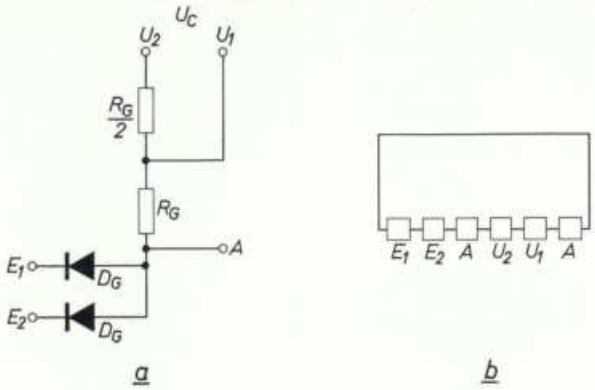


Fig. 3. *a*) Schema van de EN-poort, *b*) rangschikking van de contacten.

De *passieve* bouwsteen (*fig. 3a*) bevat een poortschakeling met diodes en weerstanden, waarbij tussen de uitgang A en de beide ingangen E_1 en E_2 het volgende EN-verband bestaat:

$$A = E_1 \cdot E_2.$$

Als poortweerstand kan men R_G of $R_G/2$ gebruiken, of — door serie- respectievelijk parallelschakelen van deze weerstanden — $3R_G/2$ respectievelijk $R_G/3$. Op deze wijze kan men de passieve bouwsteen wat betreft de belastbaarheid en het opgenomen vermogen in ruime mate aan de schakeltechnische behoefte aanpassen. Een EN-schakeling met meer dan twee ingangen kan men verkrijgen door de uitgangen van een aantal passieve bouwstenen onderling te verbinden, waarbij men slechts van één poort de weerstanden aansluit. De rangschikking van de contacten is in fig. 3*b* aangegeven.

Schakelingen samengesteld uit actieve bouwstenen

De bistabiele wipschakeling

Bij de bekende systemen van bouwstenen worden de tel- en geheugenfuncties gerealiseerd met behulp van bistabiele wipschakelingen in diverse uitvoeringen, die zijn aangepast aan de verschillende functies. Hiervoor heeft men soms de beschikking over afzonderlijke bouwstenen, soms ook moet men de wipschakelingen op de bekende wijze samenstellen uit twee NOR- of NAND-bouwstenen [4,5].

De schakeling van een uit twee actieve bouwstenen samengestelde bistabiele wipschakeling (flip-flop) is in *fig. 4a* gegeven voor de asynchrone telmethode en in fig. 4*b* voor de synchrone. In beide gevallen worden de negatieve schakelimpulsen die nodig zijn voor het blokkeren van de geleidende transistor, toegevoerd aan de ingang die met P is aangeduid. Bij de asynchrone methode zorgt de impulspoort, bestaande uit de diode D, de weerstand R_T en de condensator C_P, ervoor dat de schakelimpulsen alleen invloed hebben op de basis van de geleidende transistor [6].

Bij de synchrone methode worden aan de P-ingang voortdurend negatieve impulsen toegevoerd. Deze veroorzaken slechts dan het omschakelen van de wipschakelaar als aan de $\overline{S}$-ingangen het signaal „0" (collectorpotentiaal van een geleidende transistor) is toegevoerd. De logische afspraak is dus hier het tegengestelde van de afspraak die voor het systeem geldt;

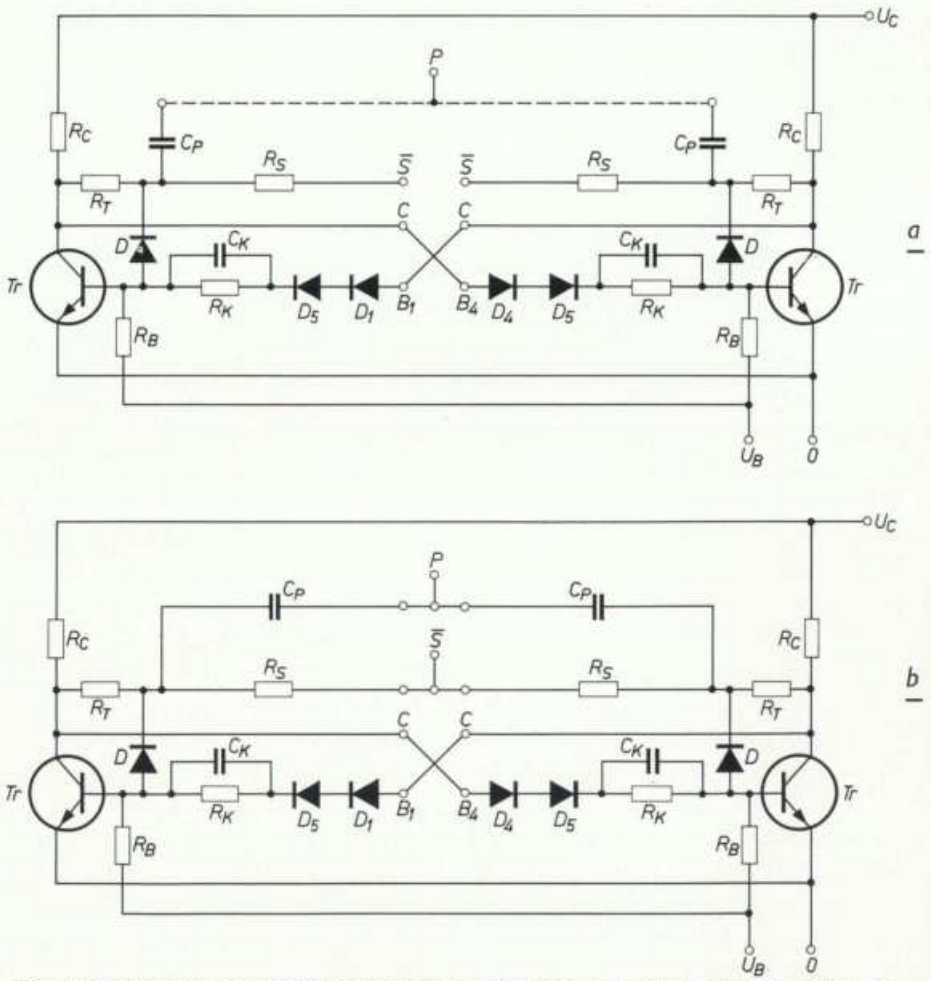


Fig. 4. Schema van een bistabiele wipschakeling (flip-flop), *a*) voor asynchrone telschakelingen, *b*) voor synchrone telschakelingen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

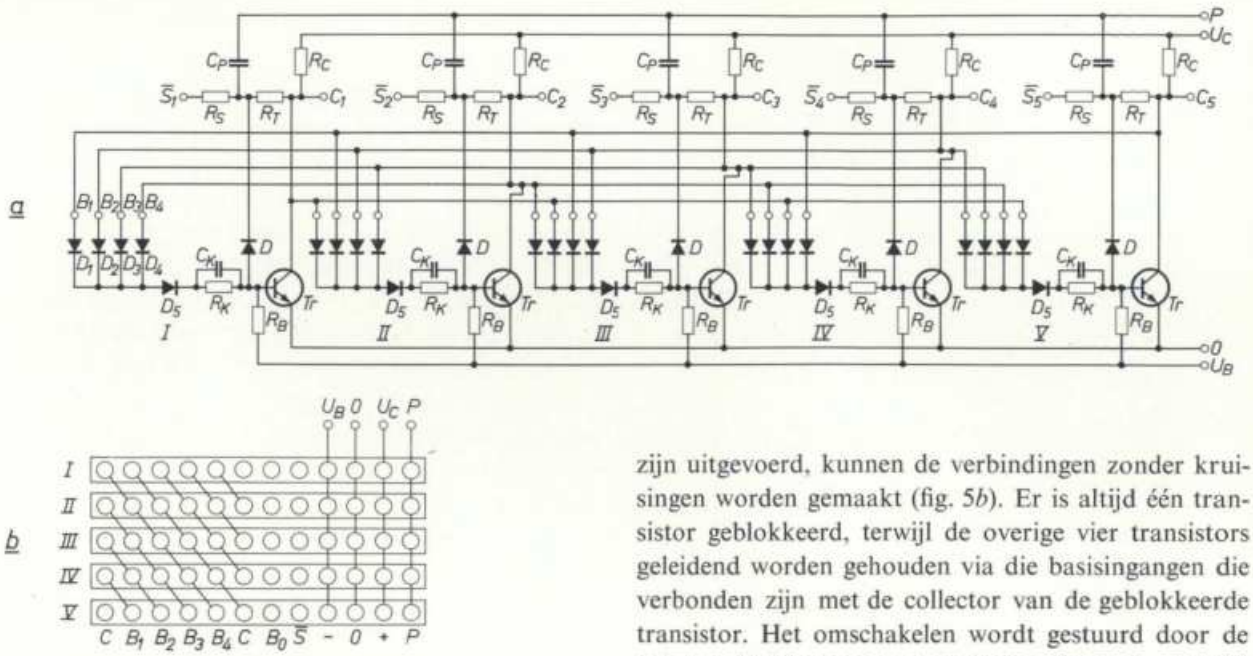


Fig. 5. Wipschakeling met vijf stabiele toestanden (quinaire wipschakeling), samengesteld uit de bouwstenen van het hier beschreven systeem. *a*) Schema, *b*) rangschikking van de bouwstenen voor bedrading zonder kruisingen.

om deze reden is de aanduiding $\bar{S}$ in plaats van S gebruikt. Voor iedere signaalingang is een omkering van het signaal nodig. Hiervoor wordt een actieve bouwsteen gebruikt, die, behalve voor het regenereren van de potentiaal, ook kan dienen voor het uitvoeren van de OF-operatie die dikwijls op deze plaats vereist wordt (zie fig. 6). Deze actieve bouwstenen mogen uitsluitend met EN-schakelingen worden belast.

Indien op de uitgangsleidingen van een bistabiele wipschakeling negatieve stoorimpulsen verschijnen, moet worden voorkomen dat zij via de interne terugkoppeling de basis van de geleidende transistor bereiken en zo de wipschakeling kunnen omschakelen. Dit kan op eenvoudige wijze geschieden door in ieder van de terugkoppeltakken een EN-poort op te nemen (decoupled flip-flop) [7]. Bij de hieronder beschreven schakelingen zijn deze maatregelen niet nodig.

Polystabiele wipschakelingen

Het nieuwe systeem van bouwstenen kent naast de bistabiele wipschakelingen ook polystabiele wipschakelingen met maximaal vijf stabiele toestanden, waarbij het aantal stabiele toestanden dat mogelijk is, overeenkomt met het aantal gebruikte actieve bouwstenen.

Bij de wipschakeling met vijf stabiele toestanden (quinaire wipschakeling) (*fig. 5a*) wordt van elk van de vijf actieve bouwstenen de uitgang verbonden met een ingang van elk van de vier andere bouwstenen. Doordat de uitgangen van de bouwstenen in tweevoud zijn uitgevoerd, kunnen de verbindingen zonder kruisingen worden gemaakt (fig. 5*b*). Er is altijd één transistor geblokkeerd, terwijl de overige vier transistors geleidend worden gehouden via die basisingangen die verbonden zijn met de collector van de geblokkeerde transistor. Het omschakelen wordt gestuurd door de centrale klokimpulsbron via de impulspoort, waarbij de potentialen aan de $\bar{S}$-ingangen bepalen welke transistor gemarkeerd (geblokkeerd) zal worden.

Uit een wipschakeling met vijf stabiele toestanden kan men een wipschakeling verkrijgen met vier resp. drie stabiele toestanden door het weglaten van één resp. twee bouwstenen, alsmede van die leidingen die dan slechts ingangen onderling verbinden.

De omkeerbare bi-quinaire teldecade

Een synchroon werkende teldecade kan men b.v. zeer eenvoudig samenstellen uit een bistabiele en een quinaire wipschakeling [8]. Aangezien de bi-quinaire telwijze zeer nauw verwant is aan de decimale — twee maal vijf is het priemgetallenprodukt van tien —, vervallen alle voorzieningen in de schakeling die zouden moeten zorgen voor het elimineren van overbodige telcapaciteit. Dit is belangrijk, want deze voorzieningen moeten voor beide telrichtingen worden aangebracht. Tevens wordt het uitlezen van de cijfers eenvoudiger dan bij de gebruikelijke teldecades die uit vier bistabiele wipschakelingen zijn samengesteld. Om uit de standen van de vier wipschakelingen tien cijfers uit te lezen, zijn tien EN-schakelingen (EN-poorten) met gemiddeld drie ingangen noodzakelijk. Bij de bi-quinaire teller kan men echter volstaan met tien EN-poorten van ieder twee ingangen. In *fig. 6* ziet men het schema van de logische schakeling van een omkeerbare bi-quinaire teldecade, waarin de codering van *Tabel I* wordt gebruikt.

Voordat een telimpuls aan de schakeling wordt toegevoerd, wordt hij eerst gesynchroniseerd met de klokimpuls en wordt zijn impulsduur gelijk gemaakt aan het tijdsinterval tussen twee klokimpulsen. Elke telimpuls, zowel voor vooruit- als voor achteruit-tellen,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel I. Codering van een bi-quinaire teldecade.

cijfer	binaire trap		quinaire trap				
	C	$\bar{C}$	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
0	0	L	L	0	0	0	0
1	L	0	L	0	0	0	0
2	0	L	0	L	0	0	0
3	L	0	0	L	0	0	0
4	0	L	0	0	L	0	0
5	L	0	0	0	L	0	0
6	0	L	0	0	0	L	0
7	L	0	0	0	0	L	0
8	0	L	0	0	0	0	L
9	L	0	0	0	0	0	L

bereidt de binaire trap B voor, waarna deze door de klokimpuls wordt omgeschakeld. De quinaire trap moet in twee situaties naar een andere stand schakelen, nl. 1) als de uitgang C van de binaire trap de potentiaal heeft die met de waarde „L" overeenkomt èn een impuls voor vooruit-tellen aanwezig is, en 2) als aan de uitgang $\bar{C}$ van de binaire trap de waarde „L" wordt aangegeven èn een impuls voor achteruit-tellen aanwezig is. Het combineren van de telimpulsen en de stand van de binaire trap wordt verzorgd door de EN-poort G_V bij vooruit- en G_R bij achteruit-tellen.

De impulsen voor de quinaire schakeling worden bij vooruit-tellen vanuit G_V toegevoerd aan de EN-poorten $G_{V1} \ldots G_{V5}$, en bij achteruit-tellen vanuit G_R aan de EN-poorten $G_{R1} \ldots G_{R5}$. Een impuls die door de quinaire schakeling vooruit moet worden geteld, zal b.v. de EN-poort G_{V2} passeren, die geopend is door het „L"-signaal aan de uitgang C_2 van de trap Q_2, en zo de signaalingang $\bar{S}_3$ van de in voorwaartse richting volgende trap Q_3 voorbereiden. Evenzo wordt bij een impuls die achteruit moet worden geteld, de EN-poort G_{R2} geopend en de in achterwaartse richting volgende trap Q_1 via de signaalingang voorbereid. Het eigenlijke overschakelen gebeurt steeds door de eerstvolgende klokimpuls die samenvalt met de telimpuls.

Bijzondere schakelingen

Een multivibrator kan worden samengesteld uit twee

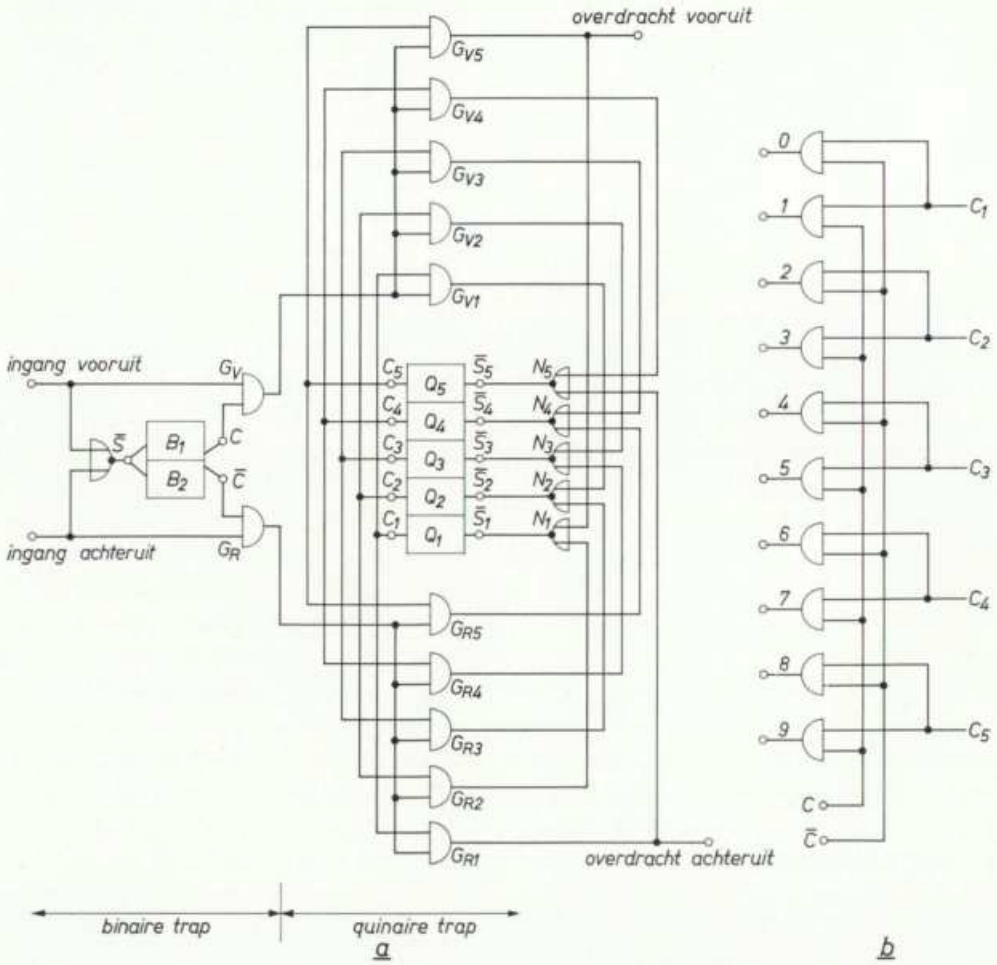


Fig. 6. *a*) Omkeerbare bi-quinaire teldecade. *b*) Bijbehorende schakeling voor het uitlezen van de cijfers. (De P-ingangen van B_1, B_2 en van $Q_1 \ldots Q_5$ moeten worden aangesloten op de gemeenschappelijke klokimpulsleiding.)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

actieve bouwstenen, door hun uitgangen C via condensatoren C_Z kruiselings te verbinden met de directe basisaansluitingen B_0 en door de aansluitingen die normaal voor negatieve resp. positieve voedingsspanning bestemd zijn, gemeenschappelijk aan de positieve voedingsspanning te leggen.

Bij de monostabiele wipschakeling wordt de statische koppeling — evenals bij de bistabiele — gevormd door de aanwezige combinatie R_K, C_K, D_4 en D_5. Een uitwendige condensator C_Z, die aangesloten moet worden tussen de collector C en de basisingang B_0, bepaalt de vertragingstijd. De basislekweerstand van de capacitief aangesloten transistor wordt verbonden met de positieve voedingsspanning, waardoor deze transistor in de stationaire toestand geleidend is. Het exciteren vindt plaats via de P-ingang van deze bouwsteen.

Een Schmitt-trigger ontstaat door twee actieve bouwstenen in serie te schakelen, waarbij de emitteraansluitingen 0 geaard worden via een gemeenschappelijke weerstand. Het drempelniveau kan worden ingesteld met behulp van een andere uitwendige weerstand, die de directe basisaansluiting B_0 van de eerste bouwsteen met de positieve voedingsspanning verbindt. Voor de sturing gebruikt men een van de NOR-ingangen van de eerste trap.

Belastingsregels

Bij het samenvoegen van actieve en passieve bouwstenen tot logische schakelingen moet men met de belastingsregels rekening houden, aangezien iedere bouwsteen door de erop volgende trappen belast wordt en op zijn beurt de sturende trap belast. Door de beperking tot twee typen bouwstenen kon men de belastingsregels eenvoudig en overzichtelijk houden.

Iedere ingang $B_1 \ldots B_n$ van een actieve bouwsteen (NOR) vormt voor de sturende trap een zg. „NOR-belasting". Iedere ingang $E_1 \ldots E_m$ van een passieve bouwsteen (EN-poort) vormt voor de sturende NOR-trap een belasting van een aantal zg. „poortbelastingen"; dit aantal is afhankelijk van de keuze van de totale poortweerstand:

totale poortweerstand	$3R_G/2$	R_G	$R_G/2$	$R_G/3$
aantal poortbelastingen k	2/3	1	2	3

De beide soorten belastingen mag men bij het berekenen van de maximaal toelaatbare belasting niet tegen elkaar verdisconteren.

Enkele uitzonderingen daargelaten, waarop in het bestek van dit artikel niet nader kan worden ingegaan, verkrijgt men de volgende vereenvoudigde belastingstabel (waarbij nog rekening moet worden gehouden met de op blz. 335 genoemde beperking bij de NOR-schakeling voor signaalomkering aan de $\overline{S}$-ingang van een bistabiele wipschakeling):

sturende trap	soort belasting	belasting
NOR	EN	$g \leqq 8$; $\Sigma k \leqq 8$
NOR	NOR	$n \leqq 4$
EN	NOR	$n \leqq k$

Hierin is g het maximale aantal poortbelastingen dat door een NOR-trap gestuurd kan worden (poortbelastingen moeten worden opgeteld, onverschillig of de EN-poorten parallel of in serie geschakeld zijn), k het aantal poortbelastingen dat met een EN-poort overeenkomt, n het maximale aantal NOR-belastingen dat door een trap gestuurd kan worden.

In *fig. 7* zijn een mogelijke uitvoering van een NOR-bouwsteen en van een EN-bouwsteen afgebeeld. Ter verhoging van de economie kan aan de beide beschre-

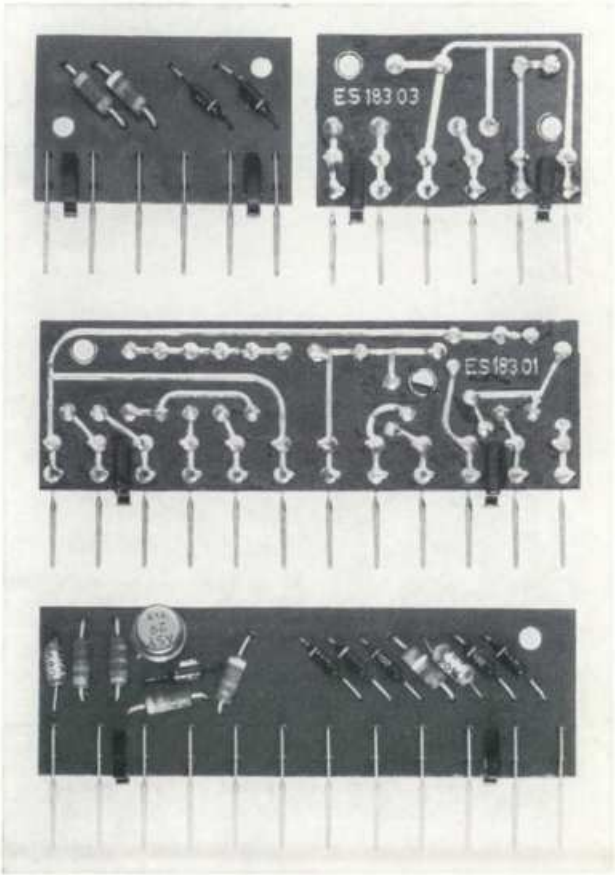


Fig. 7. Uitvoeringsvoorbeeld van twee bouwstenen, zoals o.a. in elektronische weeginstallaties zijn toegepast. Boven: EN-schakeling, midden en onder: NOR-schakeling.

ven bouwsteentypen nog een actieve bouwsteen worden toegevoegd, bestaande uit twee NOR-schakelingen zonder impulspoort. Deze kan met voordeel overal worden gebruikt waar de NOR geen deel van een multivibrator is.

In *fig. 8* is een omkeerbare bi-quinaire teldecade met

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

10 uitgangsversterkers voor de cijfers 0 . . . 9 afgebeeld.

Het hier beschreven systeem van bouwstenen is toegepast in elektronische weeginstallaties met digitale informatiecodering en -verwerking.

De synchrone bi-quinaire teldecade is ontwikkeld door P. Muuss van het laboratorium in Hamburg.

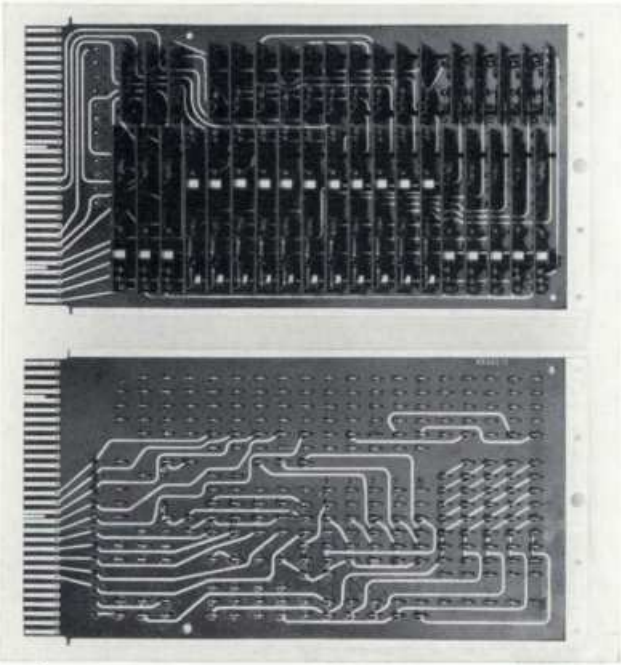


Fig. 8. Uitvoering van een synchrone omkeerbare bi-quinaire teldecade met uitgangsversterkers.

[1] G. Schinze, Das AEG-Steuerungssystem „Logistat", AEG-Mitt. **50**, 76-83, 1960.
W. Stübchen, Ruhende Steuerungen Logistat — die sinnvolle industrielle Anwendung kontaktloser Steuerungen, AEG-Mitt. **50**, 139-143, 1960.
Valvo-Handbuch Bausteine, Digitale Bausteine, Valvo GmbH, Hamburg 1962.
Catalogus van Akkord-Radio GmbH, Herxheim/Pfalz, Estacord — Das universelle Bausteinsystem für kontaktlose Steuerungen.
Catalogus 3.62 van de Firma Ebauches S.A., Neuchâtel, Zwitserland, Transistorisierte logische Einheiten.
A. Stopp, Normalkonstruktionen der BBC-Elektronik, BBC-Nachr. **42**, 199-207, 1960.
K. Stahl, M. Syrbe, H. Lisner en G. Hanke, Grundlagen und Aufbau der BBC-Elektronik, BBC-Nachr. **42**, 208-219, 1960.
[2] W. Händler, Digitale Universalrechenautomaten; Abschnitt 10.1.2.1., Vollständige Systeme, in: K. Steinbuch, Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung, Springer, Berlijn 1962.
[3] U. Weyh, Elemente der Schaltungsalgebra, R. Oldenbourg, München 1960.
[4] Valvo-Handbuch Bausteine, Norbit-Bausteine, Valvo GmbH, Hamburg 1962.
[5] E. Rohloff, Aufbau und Anforderungen bei kontaktlosen Steuerungen für die Industrie, Elektron. Rdsch. **15**, 99-102, 1961.
[6] G. Rusche, K. Wagner en F. Weitzsch, Flächentransistoren, blz. 346, Springer, Berlijn 1961.
G. Haas, Grundlagen und Bauelemente elektronischer Ziffernrechenmaschinen, blz. 198, Philips' Technische Bibliotheek, Eindhoven 1961.
[7] Zie hiervoor de volgende publikaties van Philips' Hoofdindustriegroep ICOMA, Eindhoven: The „10" series of circuit blocks, The Icomist, no. 71, mei 1964, en: Tentative data, circuit blocks, 10-series, 32/189/B/E, febr. 1965.
[8] F. Bregman, Counting circuits equipped with transistors, Philips' Natuurkundig Laboratorium Eindhoven, niet gepubliceerd.
E. Schurig, „UZ 71" — Ein neuer Universalzähler, Elektron. Rdsch. **16**, 111-114, 1962.
R. A. Hempel, A 100 kc add-subtract transistorized decade counter, Semiconductor Prod. **5**, 19-24, 1962.

Samenvatting. Beschreven wordt een nieuw systeem van digitale bouwstenen, dat — aangepast aan de speciale eisen van de industriële meet- en regeltechniek — gekenmerkt wordt door het volgende.

a) Het bevat slechts twee verschillende basisschakelingen: een actieve logische schakeling in diode-transistor-logica (DTL), en een passieve logische schakeling in diode-logica.
b) Het bevat slechts één type transistor en twee typen diodes; geen emittervolger.
c) Met de basisschakelingen van dit systeem kunnen behalve bistabiele ook polystabiele wipschakelingen met b.v. drie, vier of vijf stabiele toestanden worden samengesteld.
d) Bij bistabiele wipschakelingen kan men naar keuze gebruik maken van de synchrone of de asynchrone telmethode.
e) De bouwstenen functioneren betrouwbaar onder volle belasting in een temperatuurgebied van −10 °C . . . +50 °C bij de ongunstigste afwijkingen van de weerstanden en spanningen binnen hun toleranties en bij de kleinste stroomversterking en grootste lekstromen die bij het einde van de levensduur van de transistors kunnen optreden.
f) De belastingstabel is eenvoudig.
g) Bijzondere schakelingen, zoals multivibratoren, monostabiele wipschakelingen en Schmitt-triggers zijn, zonder het aantal bouwsteentypen te vergroten, te realiseren door eenvoudige combinatie van twee actieve bouwstenen en een of twee extra weerstanden of -condensatoren.

Het digitaal voortbrengen van muzikale toonintervallen

D. Gossel

534.321.2:621.389

Inleiding

De bekende muziekinstrumenten kan men in twee hoofdgroepen verdelen:

a) instrumenten waarvan de toonhoogte bepaald wordt bij het bespelen (b.v. alle strijk- en alle eenstemmige blaasinstrumenten),
b) instrumenten die een voorraad vaste tonen hebben, waaruit gedurende het spel volgens een programma gekozen wordt (b.v. alle toetsinstrumenten).

Daar er bij de instrumenten uit hoofdgroep (b) uit bouw- en speeltechnische overwegingen slechts een beperkte toonvoorraad toelaten kan worden, is er een bepaald systeem nodig volgens hetwelk men een beperkt aantal tonen uit het ononderbroken spectrum van

Dipl.-Ing. D. Gossel is medewerker van het laboratorium Hamburg van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

alle mogelijke toonhoogten kan uitkiezen.

Uit de muziekgeschiedenis zijn verscheidene van zulke keuzesystemen bekend [1]; deze vormen de grondslag van de verschillende toonsystemen ofwel „stemmingen". De vier belangrijkste hiervan zullen in het volgende in het kort besproken worden.

Toonsystemen

Een toonsysteem heeft men gedefinieerd [2] als een schema voor de trapsgewijze onderverdeling van het octaaf volgens zodanige regels dat er muzikaal bruikbare intervallen ontstaan.

1. De pythagoreïsche stemming

Aan de pythagoreïsche stemming, die afkomstig is van Pythagoras (600 v. Chr.), ligt de kwint (frequentieverhouding 3 : 2) ten grondslag; na het octaaf (2 : 1) is dit het eenvoudigste tooninterval. Kwinten leveren — in tegenstelling tot octaven — als men elke volgende toon steeds een gelijk interval van de vorige doet verschillen, steeds een nieuwe toon. Men vindt de pythagoreïsche intervallen I_{Py} door n kwintenstappen naar boven te gaan $(3/2)^n$ en vervolgens terug te transponeren naar het oorspronkelijke octaaf (deling door 2^m). Tonen die op deze wijze verkregen zijn, volgen de wet:

$$I_{Py} = \frac{(3/2)^n}{2^m} \; ; \; 1 \leqq I_{Py} < 2 . \quad . \; . \quad (1)$$

In de pythagoreïsche stemming zijn alle kwinten zuiver. De (grote) tertsen hebben een frequentieverhouding van 81 : 64; ze vormen geen eenvoudig grondinterval en worden tot de dissonanten gerekend.

Deze theoretische kwintencirkel sluit niet geheel. De pythagoreïsche stemming heeft dit gemeen met alle zuivere en met een aantal van de zg. „getempereerde" stemmingen; door een gebroken getal tot een zekere macht te verheffen — dit correspondeert met het aaneenschakelen van gelijke intervallen — kan men nimmer precies een geheel getal (b.v. een octaaf) verkrijgen [2]. Derhalve is het octaaf ook geen, volgens verg. (1) berekenbaar, pythagoreïsch interval.

De pythagoreïsche stemming heeft thans alleen nog maar historische betekenis. Wegens de dissonante tertsen beperkt het gebruik ervan zich tot eenstemmige muziek.

2. De „reine" stemming

De zg. reine (of: harmonische) stemming ontstaat wanneer men aan het grondinterval, de kwint (3 : 2) — en de daardoor, ter vulling van het octaaf, bepaalde kwart (4 : 3) —, als nieuw harmonisch grondinterval nog de grote terts (5 : 4) toevoegt.

Fig. 1 laat zien hoe uit het octaaf, de kwint, de kwart, de grote terts en de kleine terts (6 : 5) — deze laatste vult de grote terts aan tot een kwint — alle overige harmonische tonen ontstaan.

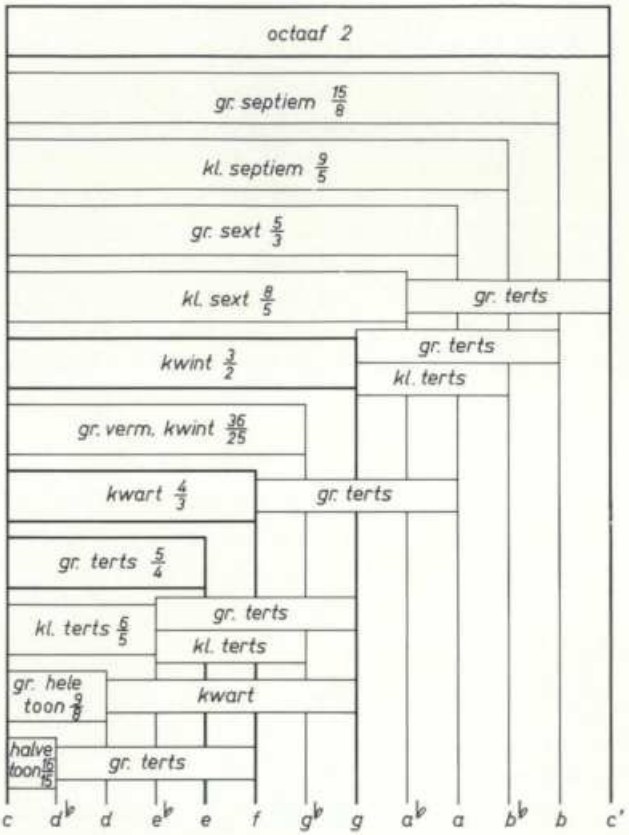


Fig. 1. „Reine" (harmonische) stemming: de intervallen worden afgeleid uit octaaf, kwint, kwart en terts.

De reine stemming kan men verwezenlijken op de in groep (a) van de inleiding genoemde instrumenten. Wegens het geringe aantal zuivere kwinten en de aldus zeer beperkte modulatiemogelijkheiden is deze stemming echter ongeschikt voor de onder (b) genoemde groep.

3. De middentoonstemming

De door Arnold Schlick in 1511 voorgestelde zg. middentoonstemming werd vroeger bij orgels zeer dikwijls toegepast. Deze levert zuivere tertsen en getempereerde kwinten op. Vier zuivere kwintenstappen leiden tot de dissonante pythagoreïsche terts (81 : 64), die in vergelijking met de zuivere terts (5 : 4) een zg. syntonische komma (81 : 80) te groot is. De getempereerde kwinten van de middentoonstemming zijn in vergelijking met de zuivere kwinten een kwart syntonische komma ($\sqrt[4]{81/80} \approx 1{,}003$) te klein, wat muzikaal niet stoort en waarmee men bereikt dat vier van zulke

[1] Zie b.v. W. Dupont, Geschichte der musikalischen Temperatur, Bärenreiter-Verlag, Kassel 1935.
[2] Volgens W. H. Westphal, Physikalisches Wörterbuch, deel II, blz. 546 en 547, Springer, Berlijn 1952.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kwinten een zuivere terts vormen. In de middentoonstemming beschikt men reeds over elf bruikbare kwinten, doch de voor het sluiten van de cirkel noodzakelijke twaalfde kwint (gis/dis) is te groot en bijgevolg onbruikbaar (zg. wolfskwint).

4. De evenredig zwevende stemming

Voor vrijwel alle toetsinstrumenten wordt thans de evenredig zwevende („wohltemperierte") stemming gebruikt. Deze danken wij in hoofdzaak aan Andreas Werckmeister en Georg Neidhard (omstreeks 1700), hoewel men dit stelsel reeds vermeld vindt bij Ramis de Pareja (1440-1500). Bij dit toonstelsel is de kwintencirkel gesloten en zijn er twaalf, onderling gelijke, getempereerde kwinten. De temperering bestaat hieruit dat het verschil tussen twaalf zuivere kwintenstappen en het zuivere octaaf (531 441 : 524 288), de zg. pythagoreïsche komma, gelijkelijk over de twaalf kwinten verdeeld wordt. Dit betekent dat de evenredig getempereerde kwint, vergeleken met de zuivere, slechts een twaalfde pythagoreïsche komma (d.i. ca. 0,1 %) te klein is. Bij de evenredig zwevende stemming is het octaaf verdeeld in twaalf volkomen gelijke intervallen van een halve toon, elk ter grootte van $\sqrt[12]{2}$.

Het voordeel van een gesloten kwintencirkel (onbeperkt voortgaande modulatiemogelijkheid) gaat ten koste van nogal scherp klinkende grote tertsen en overeenkomstig te week klinkende kleine tertsen. Aan deze accentuering van het majeur- resp. mineurkarakter went men op den duur, zoals de ervaring leert.

In *fig. 2* worden de vier behandelde toonstelsels en hun intervallen met elkaar vergeleken. Een hoek van 2π radialen stelt het octaaf voor. Als maateenheid der intervallen wordt de logaritmische cent-maat (H. Bellermann, H. J. Ellis, omstreeks 1880) gebruikt, zodat het vermenigvuldigen van frequentieverhoudingen herleid wordt tot het optellen der desbetreffende cent-maten. Er geldt dan:

$$\frac{i}{\text{cent}} = \sqrt[1200]{2}^{\log I}, \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

zodat het octaaf, met $I = 2$, een waarde $i = 1200$ cent vertegenwoordigt en de evenredig zwevend getempereerde halve toon, met $I = \sqrt[12]{2}$, een waarde van 100 cent oplevert.

Omzetten van verg. (2) in natuurlijke logaritmen geeft:

$$\frac{i}{\text{cent}} = 1730 \ln I, \quad \ldots\ldots \quad (2a)$$

terwijl bij benadering voor kleine intervallen $I = 1 + \varepsilon$ geldt:

$$\frac{i}{\text{cent}} \approx 1730\,\varepsilon. \quad \ldots\ldots \quad (2b)$$

Men kan uit fig. 2 aflezen dat de evenredig zwevende grote terts tussen de pythagoreïsche en de zuivere (harmonische) terts ligt.

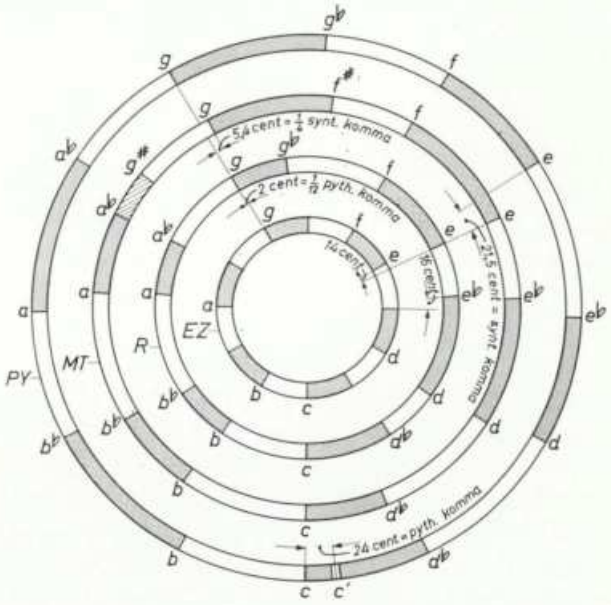


Fig. 2. Een vergelijking van de vier belangrijkste stemmingen. Een volledige cirkel (360°) stelt een octaaf voor, ofwel 1200 cent; een hoek van 1° komt dus overeen met een toonverschil van $3\frac{1}{3}$ cent.

EZ evenredig zwevende stemming,
R reine (harmonische) stemming,
MT middentoonstemming,
PY pythagoreïsche stemming.

De toonvoortbrenging en het stemmen

Voor dit artikel zijn het belangrijkst de instrumenten van de in het begin genoemde groep (b). Afgezien van enkele elektromechanische orgels, zoals het Hammondorgel, bezitten deze voor elke toon — of althans voor elk van de twaalf tonen van een octaaf — een onafhankelijke oscillator, die op het gewenste moment ingeschakeld of mede ingeschakeld wordt [3].

Het stemmen van deze oscillators (snaren, pijpen, tongen, elektronische laagfrequentiegenerators), dat om begrijpelijke redenen van tijd tot tijd herhaald dient te worden, geschiedt voor de evenredig zwevende stemming meestal in stappen van een kwint [4]. De kunst van het stemmen is hierbij deze kwint juist zo te tempereren, dat na twaalf stappen de cirkel precies gesloten wordt. In principe kan men, behalve de kwint, ook wel de kwart, de grote septime en de kleine secunde (halve toon) gebruiken bij het stemmen. Bij het stemmen in stappen van een halve toon vermijdt men het anders steeds noodzakelijke terugtransponeren naar het uitgangsoctaaf. Het op het gehoor tempereren van een dissonant is echter vrijwel onmogelijk, zodat men de voorkeur geeft aan consonante intervallen als kwinten en kwarten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Stemmen op het gehoor vereist ook dán nog concentratie, tijd en een geschoold muzikaal gehoor. Dit werk wordt gedaan door een, langzamerhand steeds kleiner wordende, groep specialisten.

Het nu volgende is gedeeltelijk gewijd aan de beschrijving van een klein elektronisch toestel met behulp waarvan het mogelijk is in zeer korte tijd zeer nauwkeurig een evenredig zwevende stemming te verkrijgen. Het afstemmen op de juiste toonhoogte geschiedt optisch, b.v. met een wijzerinstrument, en vereist generlei scholing van het gehoor. De bediening is zo eenvoudig dat er te overwegen valt zulk een elektronisch stemtoestel bij aankoop van bepaalde toetsinstrumenten mede te leveren, en dan het stemmen aan de gebruiker zelf over te laten. Een belangrijk toepassingsgebied voor het toestel voorziet men ook bij kerkorgels, die wegens de seizoenschommelingen van de temperatuur regelmatig bijgestemd moeten worden. Vooral bij grote instrumenten met hun grote aantallen registers en pijpen, was dit tot nu toe een kostbare en tijdrovende affaire.

Het digitaal voortbrengen van intervallen

Zoals bekend, kan men met behulp van digitale technieken een bepaalde frequentie f_0 door elk gewenst geheel getal z delen. Voor niet te kleine waarden van z wordt f_0 meestal toegevoerd aan een teller die, als er z impulsen geteld zijn, een terugstelimpuls afgeeft en weer opnieuw begint te tellen. De herhalingsfrequentie f van de terugstelimpulsen is f_0/z. Men kan gemakkelijk delers z_i kiezen zodanig dat de bijbehorende frequenties f_i muzikaal bruikbare intervallen opleveren.

Kiest men b.v. $z_1 = 2$ en $z_2 = 3$, dan geldt

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{f_0/z_1}{f_0/z_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{3}{2}, \quad \ldots \quad (3)$$

en verkrijgt men een zuivere kwint. Alle overige intervallen kan men op soortgelijke wijze realiseren. Het grote voordeel van deze digitale methode is dat het interval onafhankelijk is van f_0. Door f_0 te veranderen, verandert men alleen de toonhoogte, zodat er gemakkelijk getransponeerd kan worden. Mogelijk zal men met deze hulpmiddelen onderzoekingen op het gebied der muziekesthetiek kunnen verrichten en op snelle en gemakkelijke wijze verschillend getempereerde accoorden onderling en in afhankelijkheid van hun absolute toonhoogte kunnen vergelijken.

Een digitaal stemtoestel

In de evenredig zwevende stemming worden de intervallen bepaald door de formule:

$$I_{Gv} = \sqrt[12]{2^v} \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (4)$$

Bij positieve, gehele waarden van v (met uitzondering van $v = 12$, het octaaf) hebben we te maken met irrationele getallen, die niet geheel exact op digitale wijze geproduceerd kunnen worden. W. Schott van dit laboratorium heeft echter gevonden dat de evenredig getempereerde halve toon $\sqrt[12]{2}$ door het quotiënt 196/185 benaderd wordt met een onnauwkeurigheid van slechts 5×10^{-6}. Dit feit en de mogelijkheid dat men de door frequentiedeling voortgebrachte intervallen naar willekeur kan transponeren, maakten de bouw van het schematisch in *fig. 3* weergegeven stemtoestel mogelijk.

Het uitgangssignaal van een toongenerator waarvan de frequentie f_0 continu tussen 40 en 90 kHz (een gebied van iets meer dan een octaaf) kan worden gevarieerd,

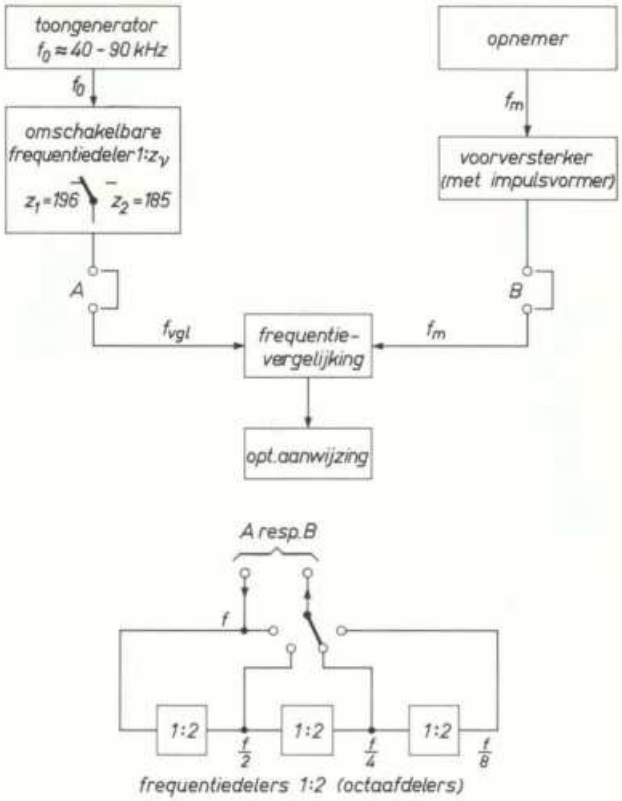


Fig. 3. Stemtoestel voor evenredig zwevende stemming. Als opnemer kan b.v. een microfoon of een magnetische opnemer dienen (voor elektronische muziekinstrumenten is geen opnemer nodig). De optische indicatie kan b.v. geschieden met een draaispoelinstrument, een gloeilamp, of een afstemindicator.

wordt aan een deeltrap toegevoerd die naar verkiezing door 196 (d.i. z_1) of 185 (d.i. z_2) kan delen. Aan de uitgang A van de deler heeft men derhalve successievelijk met $f_0/196$ en $f_0/185$ twee frequenties ter beschikking die, bij constante f_0, bijna exact een evenredig getempereerde halve toon van elkaar verschillen; we noemen deze frequenties f_1 en f_2.

[3] D. Wolkov, Electronic organ tone generators, Audio **46** (1962), no. 2, blz. 34 en no. 3, blz. 30.
[4] O. Funke, Theorie und Praxis des Klavierstimmens, Verlag Das Musikinstrument, Frankfurt a.M. 1958.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De frequentie f_m van de te stemmen toon wordt — via een bij het muziekinstrument passende opnemer — na versterking en impulsvorming, vergeleken met de frequentie f_{vgl} (als zodanig fungeert dus f_1 of f_2). Het verschil van beide frequenties kan worden afgelezen.

Het signaal dat met het frequentieverschil correspondeert, is gevoelig voor de faze; bij voorkeur wordt het frequentieverschil *zichtbaar* gemaakt. Bij het stemmen neemt men een voortdurend langzamer wordende zweving waar (schommelende uitslag van een instrument, langzaam flikkerend gloeilampje, enz.), die verdwijnt (constante uitslag, constante helderheid) zodra de frequenties precies gelijk geworden zijn.

Het stemmen verloopt als volgt:

a) De frequentiegenerator wordt ingesteld op de interne, eventueel door een kwartskristal bepaalde, standaardfrequentie van 81 400 Hz. In stand $z_2 = 185$ wordt f_{vgl} dan 440 Hz; hierop moet de toon a′ van het desbetreffende muziekinstrument gestemd worden. Het spreekt vanzelf dat a′ eveneens op elke andere gewenste hoogte, b.v. 435 Hz, kan worden ingesteld.

b) Overschakelen op $z_1 = 196$. De vergelijkingsfrequentie is nu een halve toon lager; hierop wordt as′ gestemd.

c) Terugschakelen op $z_2 = 185$ en f_0 verminderen, totdat f_{vgl} gelijk is aan de zojuist gestemde as′.

d) Omschakelen op $z_1 = 196$; stemmen van de toon g′.

e) Overschakelen op $z_2 = 185$ en f_0 verlagen tot f_{vgl} overeenkomt met de zojuist gestemde g′.

f) Omschakelen op $z_1 = 196$; stemmen van de toon fis′, enz.

Door twaalf halve tonen onder elkaar te zetten, vindt men alle vereiste intervallen en bereikt men uiteindelijk het octaaf. Rekening houdende met de systematische fout van 5×10^{-6} per stap, vindt men dit octaaf met een fout van minder dan ca. 6×10^{-5}. Ter vergelijking zij hier vermeld dat in het gebied rondom 1 kHz — daar is het menselijk oor het gevoeligst — de geringste afwijking van de priem die nog juist waarneembaar is, 1 Hz bedraagt; dit komt neer op een relatieve afwijking van 4×10^{-3}, een bedrag dat ca. honderd maal zo groot is.

Mocht de behoefte bestaan, behalve de twaalf tonen in het octaaf a-a′, ook die in de hoger of lager gelegen octaven met behulp van het apparaat te stemmen, dan kan op gemakkelijke wijze een reeks octaafdelers in de vergelijkingstak bij *A* (bas) of in de meettak bij *B* (discant) opgenomen worden. De octaafdelers zijn eenvoudige bistabiele wipschakelingen (multivibrators), die een frequentiedeling door twee bewerkstelligen.

Fig. 4a geeft een voorbeeld van een mogelijke frequentievergelijkschakeling, waarvan de werking blijkt uit fig. 4*b* en *c*. Er wordt verondersteld dat de te meten spanning U_m en de vergelijkingsspanning U_{vgl} slechts twee waarden kunnen aannemen, nl. nul en de maximale negatieve waarde. Verder moet de verhouding tussen de impulsduur en de tussentijd constant zijn.

Als logica-schakeling beschouwd, werkt de schakeling als NOR-schakeling: om de transistor geheel in te schakelen, behoeft slechts één der beide ingangsspanningen aanwezig te zijn. Om te blokkeren moeten beide ingangen de potentiaal nul bezitten.

Zijn de meet- en de vergelijkingsfrequentie ongelijk (fig. 4*b*), dan ontstaat er aan de collector van de transistor (fig. 4*a*) een reeks impulsen U_c met periodiek fluctuerende impulsbreedte. Gemiddeld correspondeert hiermee een periodiek fluctuerende gelijkstroom $\bar{U}_c$ die men op het instrument afleest.

Zijn f_m en f_{vgl} gelijk, dan vertoont U_c een *constante* impulsbreedte. De uitslag van de meter verandert dan niet. Het hangt van het toevallige fazeverschil af hoe groot de impulsbreedte is.

Met de hier beschreven optische meetmethode kunnen ook uiterst langzame zwevingen (> 1/100 Hz)

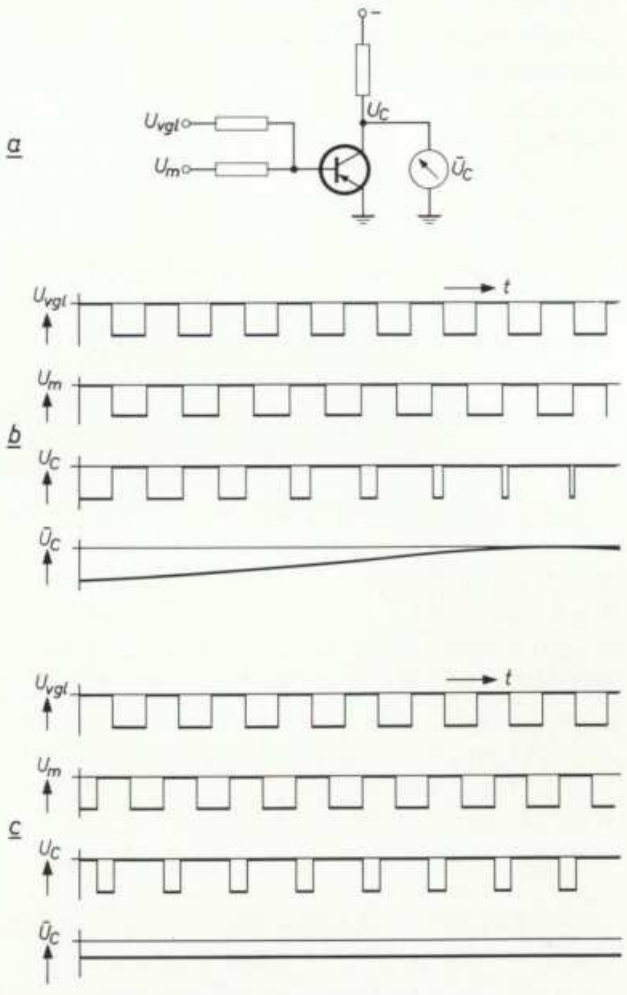


Fig. 4. *a*) Frequentievergelijkschakeling.
b) Spanningsverloop als $f_{vgl} \neq f_m$.
c) Spanningsverloop als $f_{vgl} = f_m$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

welke met het oor niet meer waarneembaar zijn, duidelijk geconstateerd worden.

Het hangt van de aard van het muziekinstrument af wat voor opnemer men moet gebruiken. Bij orgels kan men zeer goed een microfoon gebruiken; voor een vleugel of piano stellen we een speciale magnetische opnemer voor, die met permanent magnetische poolschoenen bevestigd wordt op de beide snaren die onmiddellijk ter weerszijden van de te stemmen snaar gelegen zijn; daardoor worden deze naburige snaren tevens gedempt. Deze opnemer bevat ook een kleine versterker met transistors, die een terugkoppelkring sluit waarmee de te stemmen snaar permanent in trilling gehouden wordt.

Voor een nauwkeurige frequentievergelijking zijn ongedempte trillingen van het meetobject onontbeerlijk. Proeven hebben bewezen dat gedempte trillingen, zoals er ontstaan als een snaar wordt aangeslagen, niet bruikbaar zijn.

Het gemakkelijkst is het stemmen van een elektronisch muziekinstrument, zoals de „Philicorda". Hier is geen elektro-akoestische omzetter nodig, daar wisselspanningen met de vereiste frequenties reeds in het instrument zelf beschikbaar zijn.

Proeven met de „Philicorda" hebben aangetoond dat het mogelijk is een willekeurig ontstemd instrument met behulp van het hier beschreven digitale stemtoestel in minder dan tien minuten foutloos een evenredig zwevende stemming te geven.

Instrumenten met digitaal voortgebrachte intervallen

Het is mogelijk één -of meerstemmige muziekinstrumenten te bouwen, waarbij de intervallen op digitale wijze worden voortgebracht (*fig. 5* en *6*). Meerstemmige instrumenten zijn relatief duurder, afhankelijk van het aantal tonen dat men gelijktijdig wenst voort te brengen.

Wat hun bouw betreft, gelijken beide typen op het stemtoestel. Het belangrijkste verschil is, dat het eenstemmige model een omschakelbare frequentiedeler bezit, waarmee de twaalf verschillende delers $z_1 \ldots z_{12}$ worden uitgekozen, terwijl het meerstemmige type n frequentiedelers bezit ($n \leqq 12$) die elk individueel weer op m verschillende delers z_v kunnen worden ingesteld ($m \geqq 1$).

Al deze instrumenten hebben gemeen dat zij in principe niet ontstemd kunnen geraken, daar alle tonen door numerieke deling uit een gemeenschappelijke grondfrequentie f_0 voortkomen; verder dat alle tonen eenvoudig door een verandering van f_0 getransponeerd kunnen worden. Bepalend voor de keuze van de delers is de aard van de gewenste stemming en eventueel de nauwkeurigheid waarmee men de afzonderlijke intervallen wenst te realiseren.

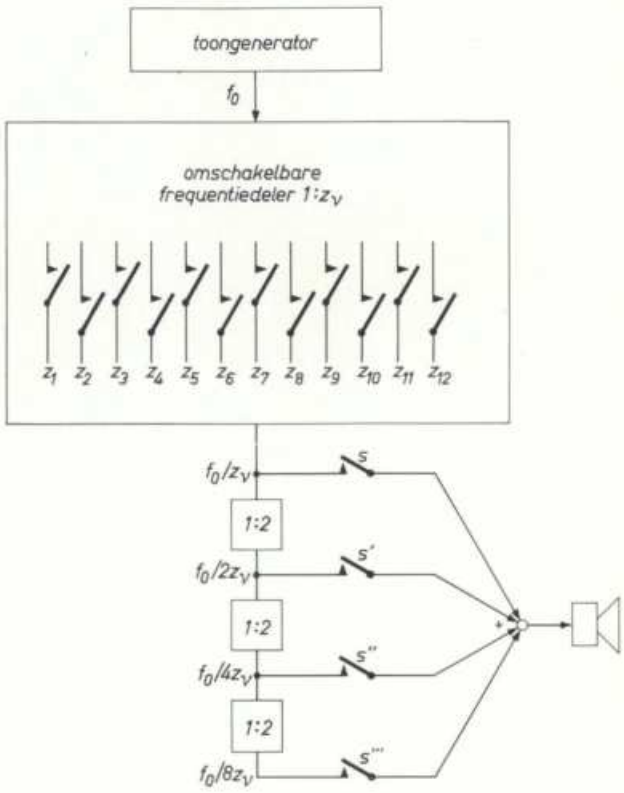


Fig. 5. Eenstemmig muziekinstrument met digitaal voortgebrachte intervallen.

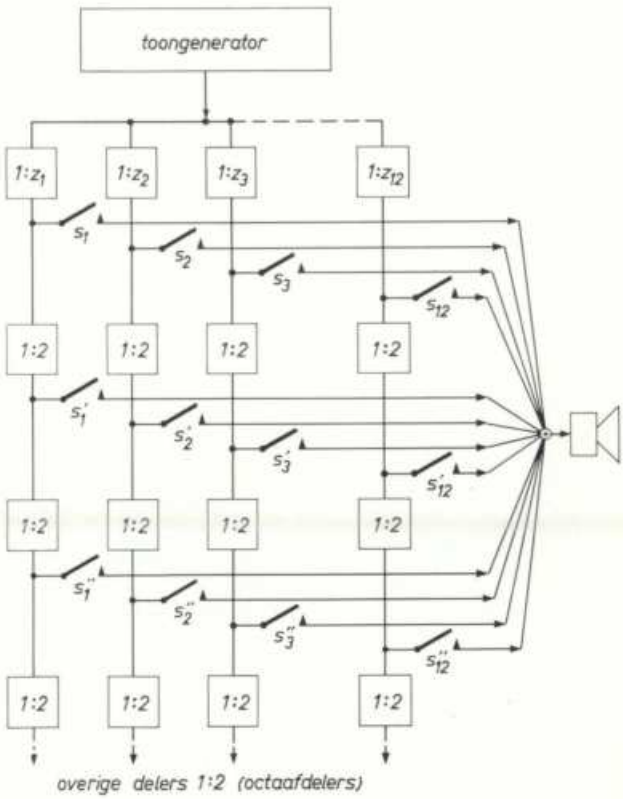


Fig. 6. Meerstemmig muziekinstrument met digitaal voortgebrachte intervallen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tot slot geven we een voorbeeld voor de reine stemming.

De grondtoon vereist, als laagste toon, de grootste deler z_1:

$$f_1 = f_0/z_1 , \quad . . . . . (5)$$

terwijl de overige tonen bepaald worden door

$$f_\nu = f_0/z_\nu , \quad . . . . . (6)$$

waarin $z_\nu < z_1$ is. Hiermede worden de delers:

$$z_\nu = z_1 \frac{f_1}{f_\nu} = \frac{z_1 b_\nu}{a_\nu} , \quad . . . . . (7)$$

waarin a_ν de tellers en b_ν de noemers der in fig. 1 vermelde frequentieverhoudingen zijn. Daar iedere z een geheel getal moet zijn en a_ν niet deelbaar is door b_ν, kan men voor z_1 het best het kleinste gemene veelvoud van alle voorkomende a_ν-waarden kiezen:

$$z_1 = 2\times2\times2\times2\times3\times3\times5 = 720.$$

Door deze waarde in verg. (7) in te vullen, kan men alle overige gehele getalwaarden van z_ν bepalen (*tabel I*).

Tabel I. Tonen en delers bij het voortbrengen van een reine stemming volgens de methode waarbij de intervallen langs digitale weg verkregen worden.

Toon	f_ν/f_1	z_ν
c	1	720
des	16/15	675
d	9/8	640
es	6/5	600
e	5/4	576
f	4/3	540
ges	36/25	500
g	3/2	480
as	8/5	450
a	5/3	432
bes	9/5	400
b	15/8	384
c'	2	360

Het feit dat z_1 niet minder dan 720 is, vereist een niet onaanzienlijke hoeveelheid elektronische onderdelen, b.v. tien bistabiele wipschakelingen met bijbehorend decoderingssysteem.

Indien men zich beperkt tot het zuiver voortbrengen van de consonante intervallen en genoegen neemt met onbeduidende afwijkingen bij de dissonanten, kan men de apparatuur aanzienlijk vereenvoudigen.

Een voorbeeld hiervan is een systeem waarbij men, ter bepaling van z_1, slechts het octaaf, de kwint, de kwart en de grote en de kleine terts in aanmerking neemt. Op deze wijze krijgt men:

$$z_1 = 2\times2\times3\times5 = 60.$$

Tabel II geeft de numerieke waarden van de delers en de onnauwkeurigheden ervan. Een positief teken geeft aan dat de aldus voortgebrachte toon te hoog is.

Tabel II. Delers en de desbetreffende fouten bij het benaderd voortbrengen van een reine stemming.

Toon	z_ν	Onnauwkeurigheid	
		‰	cent
c	60	—	—
des	56	+ 4,4	+ 7,7
d	53	+ 6,3	+10,8
es	50	—	—
e	48	—	—
f	45	—	—
ges	42	— 8,0	—13,8
g	40	—	—
as	38	—13,3	—23,1
a	36	—	—
bes	33	+10,0	+17,3
b	32	—	—
c'	30	—	—

Dit systeem is veel minder kostbaar; men heeft nu voldoende aan zes bistabiele wipschakelingen. Op deze wijze verkrijgt men zeven zuivere intervallen. Vijf intervallen zijn echter niet geheel zuiver. De kleine sext verschilt b.v. ongeveer een achtste toon van de reine stemming.

Een betere benadering, ten slotte, verkrijgt men door z_1 driemaal zo groot te kiezen, waardoor men tevens de grote hele toon, de grote verminderde kwint, en de kleine septime als zuivere intervallen verkrijgt. Het elektronische systeem wordt dan vergroot van zes tot acht bistabiele wipschakelingen. Met

$$z_1 = 2\times2\times3\times3\times5 = 180$$

verkrijgt men de delers van *tabel III*. De aldus verkregen toonschaal lijkt uitstekend bruikbaar.

Tabel III. Als tabel II, doch met betere benadering.

Toon	z_ν	Onnauwkeurigheid	
		‰	cent
c	180	—	—
des	169	—1,5	—2,6
d	160	—	—
es	150	—	—
e	144	—	—
f	135	—	—
ges	125	—	—
g	120	—	—
as	112	+4,4	+7,7
a	108	—	—
bes	100	—	—
b	96	—	—
c'	90	—	—

Samenvatting. De in de digitale techniek bekende mogelijkheid frequenties door willekeurige gehele getallen te delen, wordt hier toegepast voor het voortbrengen van muzikaal bruikbare intervallen. Na een overzicht van de belangrijkste stemmingen wordt een beschrijving gegeven van: 1) Een toestel voor het voortbrengen van een willekeurig transponeerbaar evenredig zwevend interval van een halve toon, geschikt voor het snel en nauwkeurig stemmen van toetsinstrumenten. Dit interval $^{12}\sqrt{2}$ wordt benaderd met het quotiënt 196/185 (fout kleiner dan 5×10^{-6}). 2) Een methode ter verkrijging van complete toonschalen zoals nodig zijn voor een- of meerstemmige instrumenten. Tot besluit worden enige getallenvoorbeelden van (2) gegeven voor de reine stemming.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!